नि. इ. कोशकिन, मि. ग्रि. शिर्केविच
सरल भौतिकी निदर्शिका
"मीर" प्रकाशन-गृह, मास्को
सरल भौतिकी निदर्शिका

नि० इ० कोशकिन
मि० ग्रि० शिर्केविच

सरल भौतिकी निदर्शिका

Н.И.Кошкин
М.Г.Ширкевич

СПРАВОЧНИК ПО ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ФИЗИКЕ

"Наука" Москва

नि.इ.कोशकिन
मि.ग्रि.शिर्केविच

सरल भौतिकी निर्दशिका

अनुवादक :
देवेंद्र प्र० वर्मा

"मीर" प्रकाशन-गृह, मास्को

पीपुल्स पब्लिशिंग हाउस लिमिटेड
नई दिल्ली

N.I. Koshkin
M.G. Shirkevich

HANDBOOK OF ELEMENTARY PHYSICS

परिचय

प्रो० निकोलाई इवानोविच कोशकिन (डी० एस-सी०) मास्को के क्रुप्स्काया शिक्षक-प्रशिक्षण संस्थान में भौतिकी-विभाग के अध्यक्ष हैं; मिखाइल ग्रिगोरियेविच शिर्केविच (पी-एच० डी०) लेनिनाबाद के शिक्षक-प्रशिक्षण संस्थान में भौतिकी-विभाग के डोसेंट हैं।

पुस्तक में सरल भौतिकी की सभी शाखाएं निहित हैं। इसमें भौतिक अवधारणाओं की परिभाषायें और भौतिक नियमों के संक्षिप्त विवरण दिये गये हैं। सूचनार्थ सारणियां व ग्राफ भी संकलित हैं।

पुस्तक में अंतर्राष्ट्रीय इकाई-प्रणाली और आधुनिक संकेतों का प्रयोग हुआ है. परिभाषाओं का नियमन आधुनिक भौतिकी की आत्मा के अनुकूल है।

निर्दशिका का उपयोग माध्यमिक विद्यालयों व तकनीकी विद्यालयों के छात्र कर सकते हैं। यह उन लोगों के लिये भी लाभकर सिद्ध होगी, जिन्हें विभिन्न भौतिक राशियों के साथ काम पड़ता रहता है।

На языке хинди

विषय-सूची

अध्याय 1

यांत्रिकी

A गतिकी

B. प्रवेगिकी

C. ठोस पिंडों की स्थैतिकी

D. प्रत्यास्थता-सिद्धांत के तत्त्व

E. तरल पिंडों की यांत्रिकी

अध्याय 2

ताप और आण्विक भौतिकी

अध्याय 3

यांत्रिक दोलन और तरंगें

अध्याय 4

विद्युत

A. वैद्युत क्षेत्र

B. स्थिर विद्युत-धारा

C. चुंबकीय क्षेत्र. विद्युचुंबकीय प्रेरण

D. वैद्युत दोलन और विद्युचुंबकीय तरंग

अध्याय 5

प्रकाशिकी

अध्याय 6

परमाणु की संरचना और प्राथमिक कण

परिशिष्ट

प्राक्कथन

निर्देशिका में सरल भौतिकी की सभी शाखाएं निहित हैं। प्रत्येक अध्याय (या अध्याय का अनुच्छेद) दो भागों में बँटा है। पहले भाग में मूल अवधारणाओं और नियमों का संक्षिप्त विवरण है; दूसरे भाग में सूचनार्थ सारणियां व ग्राफ दिये गये हैं।

प्रथम भाग में वर्णित सैद्धांतिक सूचनाएं पूर्णता का दावा नहीं करतीं। यहां सिर्फ मूल अवधारणाओं की परिभाषाएं दी गयी हैं, नियमों का संक्षेप में उल्लेख किया गया है; कभी-कभी समझाने के लिये कुछ उदाहरण प्रस्तुत किये गये हैं। इसीलिये इस पुस्तक को भौतिकी की पाठ्यपुस्तक का पर्याय नहीं माना जा सकता।

निर्देशिका की सारणियां और उसके ग्राफ भी भौतिकी के किसी क्षेत्र से संबंधित सारी सूचनाएं नहीं दे सकते; सिर्फ उन्हीं सूचनाओं को महत्त्व दिया गया है, जिनकी औद्योगिकी और कृषि-विज्ञान के विशेषज्ञों को आये-दिन आवश्यकता पड़ती रहती है। उन सूचनाओं के संकलन पर भी विशेष ध्यान दिया गया है, जो भौतिकी के आधुनिकतम क्षेत्रों (अर्धचालकों, सेग्नेटोविद्युत, नाभिकीय भौतिकी आदि) के साथ संबंध रखती हैं।

निर्देशिका में अंतर्राष्ट्रीय इकाई-प्रणाली को मान्यता दी गयी है। परिशिष्ट में अन्य इकाइयों के साथ उसके संबंध भी दिये गये हैं।

रूसी में पुस्तक के अब तक नौ संस्करण हो चुके हैं। प्रथम संस्करण (1960) के बाद से यह निरंतर संशोधित और परिवर्धित होती रही है।

हिंदी संस्करण में एक नया अनुच्छेद "स्थावर तरंग" जोड़ा गया है।

नि. इ. कोशकिन
मि. ग्रि. शिर्केविच

निर्दशिका के उपयोगकर्त्ताओं के लिये चंद सूचनाएं

सारणियों में पदार्थों के नाम अधिकतर स्थितियों में अकारादि क्रम में दिये गये हैं। चंद सारणियां राशियों के सांख्यिक मान के बढ़ने या घटने के क्रम के अनुसार बनायी गयी हैं।

राशियों के सांख्यिक मान दशमलव के दो-तीन अंकों की शुद्धता से दिये गये हैं; अधिकतर तकनीकी कलनों के लिये यह पर्याप्त रहता है।

सारणियों में दशमलव-अंकों की संख्याएं समान नहीं हैं। इसका कारण यह है कि कुछ पदार्थ शुद्ध रूप में प्राप्त हो सकते हैं और कुछ में अशुद्धियां मिश्रित रह जाती हैं। उदाहरणार्थ, प्लैटिनम का घनत्व चार सार्थक अंकों (21.46) की शुद्धता से दिया गया है, पर पीतल का—सिर्फ दो सार्थक अंकों की शुद्धता से (8.4-8.7), क्योंकि इसका घनत्व इन सीमाओं में कुछ भी हो सकता है; यह पीतल के दिये हुए प्रकार पर निर्भर करेगा।

यदि सारणी या ग्राफ में 10^n जैसा कोई गुणक है, तो इसका अर्थ है कि सारणी के तदनुरूप स्तंभ में राशि का मान वास्तविक मान से 10^n गुना कम है।

उदाहरणार्थ, सारणी 14 के तीसरे स्तंभ में गुणक 10^6 है, इस सारणी की पहली पंक्ति में संख्या 696 दी गयी है; इसका अर्थ है कि सूर्य की त्रिज्या $696 \cdot 10^6$ m है।

सारणियों की टिप्पणियों में वे परिस्थितियां बतायी गयी हैं, जिनमें दिये गये सांख्यिक मान प्रयुक्त हो सकते हैं (यदि सारणी के शीर्षक में ही वे पूरी तरह नहीं अभिव्यक्त हो सकी हैं)। टिप्पणियों में सारणी को उपयोग में लाने के लिये अतिरिक्त सूचनाओं के साथ-साथ अनेक अन्य प्रकार की सूचनाएं भी दी गयी हैं।

यदि पाठक को सारणी में दी गयी किसी राशि का भौतिक अर्थ पूरी तरह स्पष्ट नहीं है, तो सारणी के सही उपयोग के लिये उसे तदनुरूप अनुच्छेद "मूल अवधारणाएं और नियम" में देखना चाहिये। भौतिक राशियों की इकाइयों के बारे में जानकारी परिशिष्टों में मिल सकती है; उनमें, इसके अतिरिक्त, निकटवर्ती कलनों के सूत्र भी दिये गये है।

[पुस्तक में प्रयुक्त निम्न गणितीय संकेत कम प्रचलित हैं : tg θ, lg x, ln x। इनके अधिक प्रचलित रूप हैं (क्रमशः) : tan θ, $\log_{10}x$, $\log_e x$।

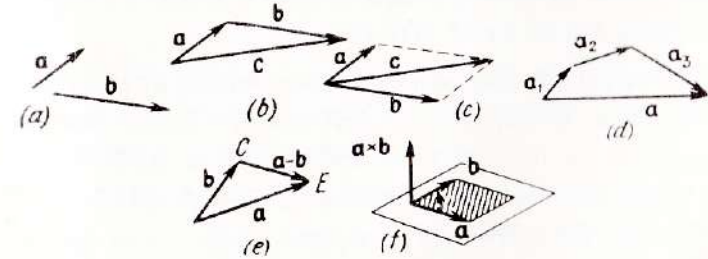
प्रतीकों के सूचक (जैसे v_{max} में max) के लिये अंतर्राष्ट्रीय रूप से मान्य संक्षेपण ही व्यवहृत हुए है, परंतु ऐसे सर्वमान्य संक्षेपणों के नहीं होने पर अक्सर तदनुरूप हिंदी शब्द के लातीनीकृत रूप के प्रथम वर्ण प्रयुक्त किये गये हैं; यथा—ω_{Pr} (Pr पृथ्वी के लिये है) या l_{anu} (anu अनुनादी के लिये है)। जहां सारे सूत्र (या भौतिकी का गणितीय भाग) लातीनी या यूनानी वर्णों में है, वहां $\omega_{पृ}$ या $l_{अनु}$ जैसी लिपि असुविधाजनक हो सकती है, इसीलिये ऐसा किया गया है। — अनु.]

भूमिका

अदिश और सदिश

भौतिकी में अदिष्ट व सदिष्ट राशियों का उपयोग होता है। अदिष्ट राशियां (अदिश) मात्र सांख्यिक मानों से निर्धारित होती हैं, पर ऐसी भी राशियां हैं, जिन्हें निर्धारित करने के लिये सांख्यिक मान के साथ-साथ दिशा के ज्ञान की भी आवश्यकता होती है। इन्हें सदिश या सदिष्ट राशियां कहते हैं। सदिश के सांख्यिक मान को **मापांक** या **परम मान** कहते हैं। (सदिश a के मापांक को |**a**| या सिर्फ a से द्योतित करते हैं। —अनु.)

सदिश का ज्यामितिक द्योतन रेखा-खंड द्वारा होता है, जिसके एक सिरे पर तीर का चिह्न बना होता है। रेखा-खंड की लंबाई (नियत पैमाने के अनुसार) सदिश के मापांक के बराबर होती है और तीर की दिशा सदिश की दिशा बताती है। दो सदिश तभी बराबर होते है, जब उनके मापांक बराबर होते हैं और उनकी दिशाएं समान होती हैं।

सदिशों a व b (चित्र 1a) **का संयोजन**[1] दो विधियों से प्राप्त हो सकता है। प्रथम विधि (चित्र 1b) : प्रत्येक सदिश को अपने आप के समानांतर इस प्रकार स्थानांतरित करते हैं कि एक का अंत (सिर) दूसरे के

चित्र 1. सदिशों के साथ क्रियाएं : a—सदिशों का ग्राफिक निरूपण; b, c—सदिशों का योग; d—सदिश का अवयवों में विघटन; e—सदिशों का व्यवकलन; f—सदिशों का सदिष्ट गुणन।

1. योगफल, जिसे परिणामी सदिश भी कहते हैं। —अनु.

आरंभ (उसकी पूंछ) के साथ मिल जाता है ; इस स्थिति में प्रथम सदिश के आरंभ से दूसरे के अंत तक खींचा गया सदिश दिये गये सदिशों का योगफल (चित्र 1b में c) होता है। इस प्रक्रिया को **सदिशीय संयोजन** कहते हैं।

दूसरी विधि (चित्र 1c) : **a** व **b** सदिशों में से प्रत्येक को अपने-आप के समानांतर इस प्रकार स्थानांतरित किया जाता है कि उनके आरंभ किसी एक बिंदु पर मिल जाते हैं। इस स्थिति में सदिशों का योगफल उन पर खींचे गये समानांतर.चतुर्भुज का कर्ण (चित्र 1c में **c**) होता है। इसीलिए कहते हैं कि सदिश समानांतर चतुर्भुज के नियम से जोड़े जाते हैं।

किसी भी सदिश **a** को $\mathbf{a}_1$, $\mathbf{a}_2$ आदि घटकों (अवयवों) में तोड़ा जा सकता है (चित्र 1d)। एक सदिश के स्थान पर कई योज्य सदिशों का उपयोग **सदिश का विघटन** कहलाता है। उदाहरण : चित्र 1d में सदिश **a** के घटक $\mathbf{a}_1$, $\mathbf{a}_2$, $\mathbf{a}_3$ हैं।

सदिश में धन अदिष्ट राशि से गुणा करने पर उसकी दिशा वही रहती है, सिर्फ उसका मापांक दूसरा हो जाता है। **सदिश में ऋण अदिष्ट राशि से गुणा** करने पर उसकी दिशा विपरीत हो जाती है। दोनों ही स्थितियों में गुणन से प्राप्त सदिश का मापांक दिये गये सदिश के मापांक और दी गयी अदिश राशि के गुणन के बराबर होता है।

दो **सदिशों का अंतर** $(\mathbf{a}-\mathbf{b})$ घटाये जाने वाले सदिश **b** की दिशा विपरीत करके उसे व्यवकल्य सदिश **a** में जोड़ने से प्राप्त होता है। चित्र 1e में सदिश **a** व **b** का अंतर है सदिश **CE**।

दो **सदिशों** **a** व **b** का **अदिष्ट गुणन** उनके मापांकों $|\mathbf{a}|$ व $|\mathbf{b}|$ और उनके बीच के कोण की कोज्या के गुणन के बराबर होता है, अर्थात् $\mathbf{a}\,\mathbf{b} = a\,b\cos(\mathbf{a}, \mathbf{b})$। सदिशों के बीच का कोण $(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ सिर्फ शून्य से π तक की सीमा में निर्धारित होता है। दो सदिशों के अदिष्ट गुणन का फल अदिष्ट राशि होता है।

दो **सदिशों** **a** व **b** का **सदिष्ट गुणन** सदिश **c** को कहते हैं। इसकी दिशा गुणित सदिशों के समतल पर लंब होती है और इसका मापांक गुणित सदिशों के मापांकों और उनके बीच के कोण की ज्या के गुणनफल के बराबर होता है, अर्थात् $|\mathbf{a}\ \mathbf{b}| = c = |\mathbf{a}| \cdot |\mathbf{b}| \sin(\mathbf{a}, \mathbf{b})$। यह गुणन चित्र 1f में दिखाया गया है (इसे कभी-कभी $\mathbf{a} \times \mathbf{b}$ से भी द्योतित किया जाता है)।

सदिश **c** की दिशा दक्षिण पेंच के नियम से निर्धारित करते हैं (यह साधारण पेंच है, जिसे कसने के लिये उसे घड़ी की सूई की दिशा में दायीं ओर घुमाते हैं) : **a** से **b** की ओर उनके बीच के छोटे कोण पर घुमाने की दिशा में पेंच को घूर्णन देने पर उसके आगे बढ़ने की दिशा सदिश [**a b**] की दिशा बताती है। विपरीत दिशा में घूर्णन देने पर पेंच के पीछे हटने की दिशा सदिश [**b a**] की दिशा बताती है।

इकाई सदिश ऐसे सदिश को कहते हैं, जिसका मापांक इकाई के बराबर होता है। किसी भी सदिश को उसके मापांक व इकाई सदिश के गुणन के रूप में व्यक्त किया जा सकता है, अर्थात् $\mathbf{b} = |\mathbf{b}|\,\mathbf{b}_0$, जहां $\mathbf{b}_0$ इकाई सदिश है; इसकी विमीयता नहीं होती और इसकी दिशा **b** की दिशा जैसी होती है।

इकाइयों की प्रणालियाँ

किसी भौतिक राशि को नापने का अर्थ है किसी दूसरी भौतिक राशि के साथ उसकी तुलना करना, जिसे इकाई मान लिया गया है। नापी जाने वाली राशि और उसकी इकाई को सजातीय होना चाहिये। सजातीय राशियां पिंड के एक ही गुण को निर्धारित करती हैं; उनमें अंतर सिर्फ सांख्यिक होता है।

भौतिक राशि की इकाई— यह भौतिक राशि की वह मात्रा है, जिसे परिभाषा से एक (इकाई) के बराबर मान लिया गया है। इकाइयां दो प्रकार की होती हैं — **मूल** व **व्युत्पन्न**।

मूल इकाइयों की मात्रा का चयन दूसरी राशियों की इकाई-मात्राओं पर निर्भर नहीं करता; व्युत्पन्न इकाई विचाराधीन राशि के साथ अन्य राशियों के संबंध द्वारा निर्धारित होती है। आपस में नियत संबंध रखने वाली मूल व व्युत्पन्न इकाइयों के समाहार को **इकाइयों की प्रणाली** कहते हैं।

आधुनिक भौतिकी में **इकाइयों की अंतर्राष्ट्रीय प्रणाली** (**अ. प्र.**) का उपयोग होता है, पर अन्य प्रणालियों की भी कुछ इकाइयां इसमें प्रचलित हैं।

अ. प्र. में सात मूल इकाइयों का उपयोग होता है : **मीटर** (m) — लंबाई की इकाई, **किलोग्राम** (kg) — द्रव्यमान की इकाई, **सेकेंड** (s) — समय की इकाई, **ऐंपियर** (A) — विद्युत-धारा की तीव्रता की इकाई, **केल्विन** (K) — तापक्रम की इकाई, **मोल** (mole) — द्रव्य की मात्रा की इकाई, **कैंडेला** (cd) — प्रकाश-तीव्रता की इकाई। मीटर निर्वात में क्रिप्टन-86 के परमाणु द्वारा उत्सर्जित तरंग की 1 650 763.73 लंबाई के बराबर होता है। यह तरंग नारंगी वर्ण या 5 d व 2 p स्तरों के बीच संक्रमण (देखें पृ. 262) के अनुरूप होती है। किलोग्राम इस इकाई के अंतर्राष्ट्रीय मानक **बाट** का द्रव्यमान है। सेकेंड सीजियम-133 के परमाणु द्वारा विकिरण के 9 192 631 770 आवर्त-कालों का समय है; यह विकिरण दो अतिसूक्ष्म स्तरों की स्पेक्ट्रमी रेखा (तरंग-लंबाई 3.26 cm) के अनुरूप होता है।

अन्य मूल इकाइयों की परिभाषाएं पुस्तक में यथास्थान दी गयी है : ऐंपियर की—पृ. 175 पर, केल्विन की—पृ. 60 पर, कैंडेला की—पृ. 211 पर और मोल की—पृ. 109 पर।

यांत्रिकी

यांत्रिक गति अन्य पिंडों के सापेक्ष किसी पिंड की स्थिति में समय के अनुसार होने वाले परिवर्तन को कहते हैं। समय के किसी नियत क्षण पर व्योम में पिंड की स्थिति किसी मापतंत्र के सापेक्ष निर्धारित की जाती है। **मापतंत्र** किसी ऐसे पिंड को कहते हैं, जिसके साथ दिशा बताने वाले अंकों का व्यूह (दिशांक-व्यूह) और समकालिक घड़ियों की कतार जुड़ी होती है।

A. गतिकी

मूल अवधारणाएं और नियम

गतिकी पिंडों की गति (यांत्रिक गति) का अध्ययन करती है, पर इस गति के कारणों की खोज-बीन नहीं करती।

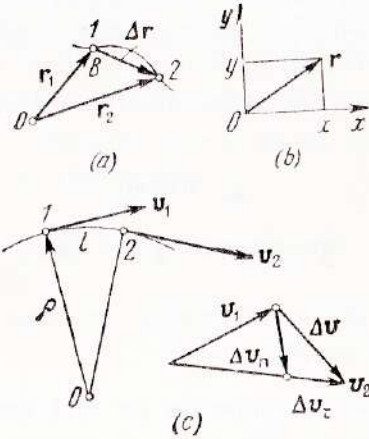
सरलतम गतिमान पिंड **भौतिक बिंदु** (या **कण**) होता है। कण ऐसे पिंड को कहते हैं, जिसकी गति को निरूपित करते वक्त उसके आकार की उपेक्षा की जा सके। उदाहरणार्थ, सूर्य के गिर्द पृथ्वी की वार्षिक गति को कण की गति के रूप में देख सकते हैं, पर पृथ्वी के अक्ष के गिर्द उसकी दैनंदिन घूर्णन-गति को कण की गति मानना असम्भव है।

किसी भी ठोस पिंड को आपस में मजबूती से जुड़े हुए अनेक कणों का व्यूह माना जा सकता है।

गतिमान कण द्वारा निरूपित रेखा को **पथ** (या **गतिपथ**) कहते हैं। पथ के अनुसार गति **ऋजु** हो सकती है (जब पथ सीधा या ऋजु होता है) या **वक्र** हो सकती है (जब पथ वक्र होता है)। अपनी प्रकृति के अनुसार गति समरूप या परिवर्ती (पुनः, समपरिवर्ती या विषमपरिवर्ती) हो सकती है।

1. स्थानांतरण, वेग, त्वरण

गति का सरलतम रूप समरूप गति है। **समरूप गति** में पिंड समय के समान अंतरालों में समान दूरियां तय करता है। विपरीत स्थिति में गति **परिवर्ती** कहलाती है। समरूप गति का **वेग** (v) इकाई समय (t) में तय किये गये पथ की लंबाई (s) को कहते हैं : $v=s/t$। कण की **गति निरूपित** करने की तीन **विधियां** हैं।

प्रथम विधि. बिंदु B की स्थिति किसी अचल बिंदु O से खींचे गये त्रिज्य सदिश $\mathbf{r}_1$ द्वारा निर्धारित की जाती है (चित्र 2*a*)। गति के कारण

चित्र 2. किसी कण की स्थिति निर्धारित करने की तीन विधियां :
a—सदिश विधि; b—दिशांक विधि; c—पथ के अनुसार।

समय के अंतराल Δt में बिंदु B स्थिति 1 से स्थिति 2 पर स्थानांतरित हो जाता है। नयी स्थिति में बिंदु का त्रिज्य सदिश $\mathbf{r}_2$ हो जाता है। सदिशों के अंतर $\mathbf{r}_2-\mathbf{r}_1=\Delta\mathbf{r}$ को **स्थानांतरण** कहते हैं और $\Delta r/\Delta t$ को **औसत वेग** कहते हैं।

समय के दिये गये क्षण में वेग (या क्षणिक वेग) की परिभाषा निम्न है :

$$\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta r}{\Delta t}=v \qquad (1.1)$$

वेग एक सदिष्ट राशि है।[1] वेग की इकाइयां हैं—**मीटर प्रति सेकेंड** (m/s), सेंटीमीटर प्रति सेकेंड (cm/s), किलोमीटर प्रति घंटे (km/h)।

गतिमान कण का **त्वरण**

$$\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta v}{\Delta t}=a \qquad (1.2)$$

कहलाता है, जहां Δv समय के अंतराल Δt के दरम्यान होने वाला वेग-परिवर्तन है। त्वरण का सदिश वेग के सदिश में होने वाले परिवर्तन को निर्धारित करता है।

त्वरण की इकाई मीटर प्रति वर्ग-सेकेंड (m/s^2) है।

यदि कण की गति के दौरान उसका त्वरण स्थिर रहता है ($a=$const), तो ऐसी गति को **समपरिवर्ती** कहते हैं और इस स्थिति में

$$\mathbf{v}=\mathbf{v}_0+\mathbf{a}t, \qquad (1.3)$$

$$\mathbf{r}=\mathbf{r}_0+\mathbf{v}_0t+\frac{\mathbf{a}t^2}{2} \qquad (1.4)$$

होता है, जहां $\mathbf{v}_0$ व $\mathbf{r}_0$ समय के आरंभिक क्षण ($t=0$) में क्रमशः वेग व त्रिज्य सदिश हैं। समपरिवर्ती गति में कण का पथ ऋजुरेखीय होता है, यदि $\mathbf{v}_0 \parallel \mathbf{a}$। इस स्थिति में समीकरण (1.3) व (1.4) को अदिष्ट रूप में लिखा जा सकता है :

$$v_t=v_0+at,\ s=v_0t+\frac{at^2}{2}, \qquad (1.5)$$

जहां v_t समय के t क्षण पर वेग है, v_0 समय के आरंभिक क्षण ($t=0$) पर वेग है, s—समय t में तय किया गया पथ है।

त्वरण धनात्मक हो सकता है (**त्वरित गति**) या ऋणात्मक (**मंदित गति**)।

(1.5) से ज्ञात होता है कि

$$v_t^2=v_0^2+2as \qquad (1.6)$$

---

1. वेग के मापांक (अदिष्ट राशि) के लिए हिंदी में विशेष शब्द भी है—चाल या क्षिप्रता। इन शब्दों का प्रयोग तब होता है, जब वेग की दिशा संदर्भ से बाहर होती है, अर्थात जब गति के वर्णन में इसकी दिशा बताने की कोई आवश्यकता नहीं होती। वैसे, गति दिशाहीन कभी नहीं होती। —अनु०

स्थिर त्वरण के साथ ऋजु गति का एक विशेष उदाहरण है—किसी कम (पृथ्वी की त्रिज्या की तुलना में बहुत ही कम) ऊँचाई से पिंडों का गिरना (अभिपातन)। यदि h से ऊँचाई, t से अभिपातन-काल (यहां $v_0=0$) और g से स्वतन्त्र अभिपातन के त्वरण को द्योतित किया जाये, तो

$$h=\frac{gt^2}{2} \qquad (1.7)$$

दूसरी विधि. दिशांक-मूल से खींचे गये Ox, Oy, Oz अक्षों पर त्रिज्य सदिश के प्रक्षेप निर्धारित किये जाते हैं (चित्र 2b), जो समय पर निर्भर करते हैं : $x=x(t)$, $y=y(t)$, $z=z(t)$। इसके बाद उन्हीं अक्षों पर वेगों के सदिशों के प्रक्षेप v_x, v_y, v_z और त्वरण के प्रक्षेप a_x, a_y, a_z निर्धारित किये जाते हैं; जैसे :

$$v_x=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta x}{\Delta t}$$

$$a_x=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta v_x}{\Delta t} \text{ आदि।}$$

वेग के सदिश का मापांक

$$v=\sqrt{v^2_x+v^2_y+v^2_z}$$

होगा और त्वरण के सदिश का मापांक

$$|a|=\sqrt{a^2_x+a^2_y+a^2_z}$$

होगा।

तीसरी विधि. गतिमान कण की स्थिति दूरी l द्वारा निर्धारित की जाती है, जिसे चुने गये दिशांक-मूल से (जैसे चित्र 2c में बिंदु 1 से) पथ के अनुतीर नापते हैं। दूरी l को चापीय दिशांक कहते हैं। चापीय दिशांक पर माप की धनात्मक दिशा चुनी जाती है और समय पर उसकी निर्भरता निर्धारित की जाती है।

वेग का मापांक होगा

$$|\mathbf{v}_\tau|=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta l}{\Delta t} \qquad (1.8)$$

वेग $\mathbf{v}_\tau$ के सदिश की दिशा पथ की स्पर्शरेखा पर कण के स्थानांतरण

की ओर होती है : वेग का मापांक ही नही उसकी दिशा भी बदलती रहती है। चित्र 2c में बिंदु 1 पर समय के क्षण t में वेग $\mathbf{v}_1$ और बिन्दु 2 पर समय के क्षण $t+\Delta t$ में वेग $\mathbf{v}_2$ दिखाया गया है। समय के अतराल Δt के दौरान वेग में पूर्ण परिवर्तन $\Delta\mathbf{v}=\Delta\mathbf{v}_\tau+\Delta\mathbf{v}_n$ है ; $\Delta\mathbf{v}_\tau$ वेग के मापांक में परिवर्तन और $\Delta\mathbf{v}_n$ वेग की दिशा में परिवर्तन को निर्धारित करता है।

कण का त्वरण दो अवयवों (घटकों) से मिल कर बना होता है। ये हैं—$\mathbf{v}_\tau$ के मापांक में परिवर्तन की दर और $\mathbf{v}_n$ के मापांक में परिवर्तन की दर, अर्थात्

$$\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta v_\tau}{\Delta t}=a_\tau,\ \mathbf{a}_\tau=a_\tau\tau, \qquad (1.9)$$

$$\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta v_n}{\Delta t}=a_n,\ \mathbf{a}_n=a_n\mathbf{n}. \qquad (1.10)$$

जहां τ स्पर्शरेखा की दिशा में इकाई सदिश है, $\mathbf{n}$ पथ के साथ लंब दिशा में इकाई सदिश है।

सदिश $\mathbf{a}_\tau$ व $\mathbf{a}_n$ क्रमश: **स्पर्शरेखी** व **अभिलंबी** त्वरण कहलाते हैं ; $\mathbf{a}_\tau$ की दिशा पथ के साथ स्पर्शरेखा बनाती है और a_n की दिशा पथ के अभिलंब, पथ की वक्रता के केन्द्र की ओर होती है।

$$a_n=\frac{v^2_\tau}{\rho} \qquad (1.11)$$

होता है, जहां v_τ स्पर्शरेखी वेग है और समीकरण (1.8) द्वारा निर्धारित होता है। ρ पथ-वक्रता की त्रिज्या है।

वक्र पथ पर गति के पूर्ण त्वरण का मापांक

$$|a|=\sqrt{a_\tau^2+a_n^2} \qquad (1.12)$$

2. घूर्णन-गति

किसी अक्ष के गिर्द **बिंदु की** वलन-गति एक ऐसी गति है, जिसमें बिंदु अक्षासीन केन्द्र के गिर्द (और अक्ष के अभिलंब तल में) एक वृत्ताकार पथ निरूपित करता है। किसी अक्ष के गिर्द **पिंड की घूर्णन-गति** एक ऐसी गति है, जिसमें पिंड के सभी बिंदु अक्ष के गिर्द वलन करते हैं।

पिंड की घूर्णन-गति के कारण पिंड के किसी भी बिंदु की स्थिति को घूर्णनाक्ष के सापेक्ष निर्धारित करने वाला सदिश कोई कोण φ निरूपित करता है। यहां दिशांक-मूल का काम पथ (अर्थात् वृत्त) का केन्द्र करता है।

समरूप घूर्णन ऐसी गति है, जिसमें पिंड समान अंतरालों में समान कोण बनाता हुआ घूर्णन करता है।

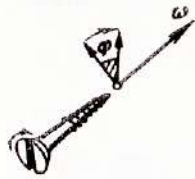
समरूप घूर्णन का **कोणिक वेग** ω इकाई समय में निरूपित कोण है :

$$\omega = \frac{\varphi}{t} \qquad (1.13)$$

जहां φ = समय t में निरूपित कोण। φ को रेडियन (rad) में नापते है।

कोणिक वेग को **घूर्णनावृत्ति** (इकाई समय में चक्करों की संख्या) n या **घूर्णन-काल (आवर्त-काल,** एक पूर्ण चक्कर में व्यतीत समय) T द्वारा भी व्यक्त कर सकते हैं। इन राशियों का आपसी संबंध है :

$$\omega = 2\pi n = \frac{2\pi}{T} \qquad (1.14)$$

कोणिक वेग एक सदिष्ट राशि है। कोणिक वेग ω के सदिश की दिशा **दक्षिण पेंच के नियम** से निर्धारित होती है (चित्र 3) : यदि पेंच को पिंड के घूर्णन की दिशा में घुमाया जाये, तो पेंच के रैखिक स्थानांतरण की दिशा ω की दिशा के अनुरूप होगी। इस सदिश की दिशा घूर्णनाक्ष के अनुतीर होती है।

चित्र 3. कोणिक वेग की दिशा ज्ञात करने के लिये दक्षिण पेंच का नियम।

कोणिक वेग की इकाई रेडियन प्रति सेकेंड (rad/s) है।

घूर्णनरत बिंदु का **रैखिक वेग** उसका क्षणिक वेग $\mathbf{v}_{\tau}$ कहलाता है [दे. (1.8)] :

$$\mathbf{v}_{\tau} = [\omega \mathbf{R}], \; |\mathbf{v}_{\tau}| = \omega R \qquad (1.15)$$

जहां $\mathbf{R}$ = बिंदु से होकर घूर्णनाक्ष के लंब की दिशा में गुजरने वाला त्रिज्य सदिश।

विषमपरिवर्ती घूर्णन की स्थिति में **क्षणिक** व **औसत कोणिक वेगों** के बीच भिन्नता दिखायी जाती है। यदि समय के क्षण t से क्षण $t+\Delta t$ के दरम्यान पिंड कोण $\Delta\varphi$ निरूपित करता है, तो अंतराल Δt में औसत कोणिक वेग निम्न अनुपात कहलाता है :

$$\omega_{av} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$$

परिभाषा के अनुसार समय के क्षण t में क्षणिक कोणिक वेग

$$\omega = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \qquad (1.16)$$

रैखिक गति के अनुरूप, कोणिक वेग के परिमाण को **कोणिक क्षिप्रता** कहते हैं।

कोणिक त्वरण ε कोणिक वेग में परिवर्तन की दर है; परिभाषा के अनुसार **कोणिक** त्वरण का मापांक

$$\varepsilon = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t}, \qquad (1.17)$$

जहां $\Delta\omega$ = अंतराल Δt में कोणिक वेग का परिवर्तन।

समपरिवर्ती घूर्णन में ε = const होता है (प्रत्येक Δt अंतराल में समान $\Delta\omega$ कोण बनता है)।

कोणिक त्वरण एक सदिष्ट राशि है। यदि कोणिक वेग में वृद्धि होती है, तो कोणिक त्वरण के सदिश ε की दिशा सदिश ω जैसी ही होती है। यदि कोणिक वेग का ह्रास होता है, तो सदिश ε की दिशा सदिश ω के विपरीत होती है।

कोणिक त्वरण की इकाई रेडियन प्रति वर्ग-सेकेंड (rad/s^2) है।

यदि समपरिवर्ती घूर्णन की प्रकृति घूर्णनावृत्ति n द्वारा व्यक्त की जाये, तो

$$\varepsilon^* = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta n}{\Delta t} \qquad (1.17a)$$

होगा, जहां Δn = अंतराल Δt में घूर्णन की आवृत्ति का परिवर्तन है।

घूर्णन आरंभ होने के बाद समय t बीतने पर कोणिक वेग ω व घूर्णन की आवृत्ति n क्रमशः

$$\omega = \omega_0 + \varepsilon t, \; n = n_0 + \varepsilon^* t \qquad (1.18)$$

होंगे, जहां ω_0 व n_0 समय नापना शुरू करने के क्षण क्रमशः कोणिक वेग व घूर्णनावृत्ति हैं।

समपरिवर्ती घूर्णन में घूर्णन-कोण

$$\varphi=\omega_0 t+\frac{1}{2}\varepsilon t^2 \qquad (1.19)$$

स्थिर (अचल) अक्ष के गिर्द समपरिवर्ती घूर्णन की अवस्था में पिंड के सभी बिंदु त्वरण के साथ **गतिमान** रहते हैं, क्योंकि उनके वेग की दिशा निरंतर बदलती रहती है। इस स्थिति में अभिलंबी त्वरण की दिशा घूर्णनाक्ष की ओर (अर्थात् रैखिक वेग की लंब दिशा में) होती है; इसे केन्द्रमुखी त्वरण कहते हैं :

$$a_c=\frac{v^2}{R}=\omega^2 R \qquad (1.20)$$

जहां v=रैखिक वेग, ω=कोणिक वेग, R=परिधि की त्रिज्या, जिस पर बिंदु घूम रहा है।

3. जड़त्वी और अजड़त्वी मापतंत्र

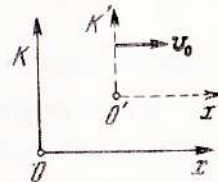
वेग व त्वरण सामान्यतः मापतंत्र पर निर्भर करते हैं। मान लें कि मापतंत्र K' तंत्र K के सापेक्ष वेग $\mathbf{v}_0$ व त्वरण $\mathbf{a}_0$ से गतिमान है। यदि तंत्र K' में बिंदु का वेग $\mathbf{v}'$ और त्वरण $\mathbf{a}'$ है, तो तंत्र K में बिंदु के वेग व त्वरण निम्न सूत्रों द्वारा व्यक्त होंगे :

$$\mathbf{v}=\mathbf{v}_0+\mathbf{v}',\ \mathbf{a}=\mathbf{a}_0+\mathbf{a}' \qquad (1.21)$$

यदि तंत्र K' तंत्र K के सापेक्ष स्थिर वेग से गतिमान है ($\mathbf{v}_0$=const, $\mathbf{a}_0=0$), तो $\mathbf{a}=\mathbf{a}'$।

एक दूसरे के सापेक्ष स्थिर वेग से गतिमान मापतंत्र **जड़त्वी (माप-) तंत्र** कहलाते हैं। जड़त्वी मापतंत्रों में त्वरण समान होते हैं। स्थिति-विशेष में (जब v_0 स्थिर होता है और उसकी दिशा अक्ष Ox के अनुतीर होती है और साथ ही, दोनों तंत्रों के अक्ष परस्पर समांतर होते हैं) तंत्रों के दिशांक **गैलीली के** निम्न **रूपांतरकारी सूत्र** द्वारा जुड़े होते हैं (चित्र 4) :

$$x'=x-v_0 t,\ y'=y,\ z'=z,\ t'=t \qquad (1.22)$$

(लकीर से अंकित राशियां तंत्र K' से संबद्ध हैं)।

चित्र 4. जड़त्वी मापतंत्रों की स्थितियों का आरेख।

बहुत बड़े वेगों की स्थिति में गैलीली के रूपांतरकारी सूत्र कारगर नहीं होते; उनकी जगह **लौरेंस की रूपांतरकारी विधि** का प्रयोग होता है। स्थिति-विशेष ($v_0 \parallel Ox$) के लिये, जिस पर नीचे विचार किया गया है, ये रूपांतरण निम्न प्रकार से लिखे जाते हैं :

$$x'=\frac{x-v_0 t}{\sqrt{1-\beta^2}},\quad y'=y,\quad z'=z,\quad t'=\frac{t-\frac{xv_0}{c^2}}{\sqrt{1-\beta^2}} \qquad (1.23)$$

जहां $\beta=v_0/c$, c=निर्वात में प्रकाश-वेग।

वेग के बहुत कम होने पर (जब $v_0 \ll c$ हो) लौरेंसी रूपांतरण गैलिलियन में संक्रमण कर जाता है। लौरेंसी रूपांतरण के अनुसार गतिमान तंत्र में रेखाखंडों के आकार छोटे हो जाते हैं :

$$l'=l_0\sqrt{1-\beta^2} \qquad (1.24a)$$

जहां l_0=रेखाखंड की निजी लंबाई, अर्थात् उस मापतंत्र में रेखाखंड की लंबाई, जिसके सापेक्ष वह अचल है। वेग $\mathbf{v}_0$ के सदिश की लंब दिशा में स्थित सदिश किसी भी जड़ मापतंत्र में समान लंबाई रखता है।

गतिमान मापतंत्र में समय के अंतराल लमड़ जाते हैं।

$$\tau'=\frac{\tau_0}{\sqrt{1-\beta^2}} \qquad (1.24b)$$

जहां τ_0=स्थानीय समय (अचल मापतंत्र में मापा गया अंतराल)।

वेगों को जोड़ने का नियम : यदि अचल मापतंत्र K में वेग के प्रक्षेप v_x व v_y हैं, तो गतिमान मापतंत्र K' में

$$v_x'=\frac{v_x-v_0}{1-v_x v_0/c^2},$$

$$v_y'=\frac{v_y\sqrt{1-\beta^2}}{1-v_x v_0/c^2}. \qquad (1.25)$$

त्वरण के साथ गतिमान मापतंत्र को **अजड़त्वी मापतंत्र** कहते हैं।

यदि अजड़त्वी मापतंत्र K' अक्ष के गिर्द स्थिर कोणिक वेग ω से गतिमान है और कोई कण K' के सापेक्ष वेग $\mathbf{v}'$ से चल रहा है, तो तंत्र K में कण का वेग होगा

$$\mathbf{v}=\mathbf{v}'+[\omega\ \mathbf{r}] \qquad (1.26)$$

उपरोक्त स्थिति में कण का त्वरण तीन अवयवों से मिलकर बनता है :

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}' + 2[\omega\, \mathbf{v}'] - \omega^2 \rho$$

जहां $\mathbf{a}'$ = तंत्र K' में त्वरण, $\mathbf{r}$ = कण का त्रिज्य सदिश, जो तंत्र K' के घूर्णनाक्ष के किसी मनमाने बिंदु से खीचा गया है, ρ = घूर्णनाक्ष से अभिलंब खीचा गया त्रिज्य सदिश । सदिश $2[\omega . \mathbf{v}']$ द्वारा **घूर्णन का त्वरण** निर्धारित होता है और सदिश $\omega^2 \rho$ द्वारा – **अक्षोन्मुखी त्वरण** ।

अजड़त्वी मापतंत्रों में त्वरण भिन्न होते हैं, जबकि जड़त्वी मापतंत्रों में त्वरण समान होते हैं ।

4. पार्थिव गुरुत्वाकर्षण-क्षेत्र में पिंडों की गति

पृथ्वी से जुड़े हुए मापतंत्र को अनेक सारी स्थितियों में (पर हमेशा नहीं) जड़त्वी माना जा सकता है । पृथ्वी कोणिक वेग $\omega_{pr} = 7.10^{-5}$ rad/s से दैनंदिन घूर्णन में रत रहती है, इसीलिये उससे संबद्ध पिंड केंद्रमुखी त्वरण $a_{pr} = \omega^2_{pr} R_{pr}$ रखते हैं [दे. (1.20)]; पृथ्वी की त्रिज्या औसतन $R_{pr} = 6.10^8$ cm है और $a_{pr} = 3\text{cm/s}^2$ है । चूंकि राशि $a_{pr} \ll g$ ($g = 9.8$ m/s²), इसलिए हम उसकी उपेक्षा कर सकते हैं और पृथ्वी से जुड़े हुए मापतंत्र को जड़त्वी मान सकते हैं । नीचे ऐसा ही जड़त्वी तंत्र प्रयुक्त हुआ है ।

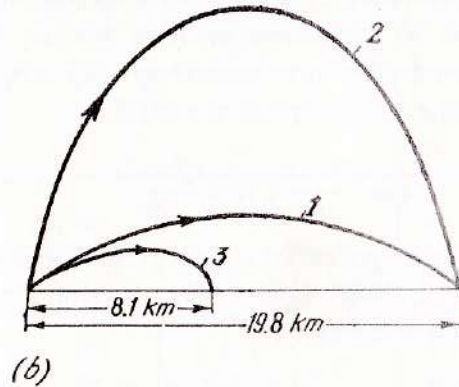
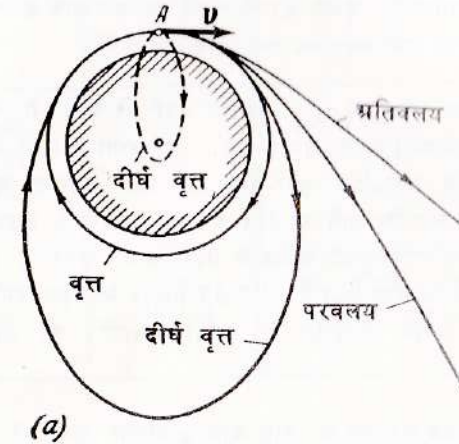
चित्र 5a में धरातल के निकटवर्ती बिंदु A से प्रक्षिप्त पिंडों का पथ दिखाया गया है ।* प्रत्येक स्थिति में वेग की दिशा क्षैतिज है । पिंड का पथ वृत्ताकार होता है, यदि बिंदु A पर पिंड का वेग v इतना बड़ा होता है कि स्वतंत्र अभिपातन का त्वरण g और केंद्रमुखी त्वरण v^2/R बराबर रहते हैं (R = पथ की त्रिज्या, जिसे पृथ्वी की त्रिज्या के बराबर माना जा सकता है, यदि ऊँचाई बहुत अधिक नहीं है) ।

इससे

$$v_1 = \sqrt{Rg} = 7.93 \text{ km/s}$$

इसे **प्रथम अंतरिक्षी वेग** कहते हैं । यदि बिंदु A पर पिंड का वेग 7.93

* यहां हवा के प्रतिरोध को ध्यान में नहीं रखा गया है ।

km/s से अधिक है, पर 11.16 km/s से कम है, तो पिंड का पथ दीर्घवृत्त होता है, जिसकी प्रक्षेप-बिंदु के निकट वाली नाभि पृथ्वी के केंद्र पर होती है (चित्र 5a में यह दीर्घवृत्त सतत रेखा द्वारा दिखाया गया है) ।

चित्र 5. पार्थिव गुरुत्वाकर्षण-क्षेत्र में पिंड का गतिपथ : a — विषमरूप गुरुत्वाकर्षण-क्षेत्र में वेग अधिक होने पर; b — समरूप गुरुत्वाकर्षण-क्षेत्र में (सतह के निकट कम वेग पर) । चित्र 5b में दिखाये गये पथों के लिये आरंभिक वेग $v_0 = 550$ m/s है; वक्र 1 $\alpha = 20°$ के लिये है, वक्र 2 – $\alpha = 70°$ के लिये, वक्र 3 – $\alpha = 20°$ के लिये, पर हवा के प्रतिरोध को ध्यान में रखते हुए ।

पिंड का आरंभिक प्रक्षेप-वेग $v_2 = 11.16$ km/s होने पर पिंड का पथ परवलय का आकार ग्रहण कर लेता है। v_2 **द्वितीय अंतरिक्षी वेग है।** आरंभिक वेग 11.16 km/s से अधिक होने पर पिंड का पथ अतिवलय जैसा होता है। अंतिम दो स्थितियों में पिंड पृथ्वी को छोड़ कर अंतर्ग्रही व्योम में यात्रा करने लगता है। पृथ्वी को छोड़ कर दूर चले जाने के लिये आवश्यक निम्नतम वेग कभी-कभी **स्वातंत्र्य वेग** भी कहलाता है।

पिंड का वेग 16.67 km/s (तृतीय अंतरिक्षी वेग) से कम होने पर पिंड सूर्य की परिक्रमा करने वाला 'ग्रह' बन जाता है। 16.67 km/s से अधिक वेग होने पर पिंड सौर-मंडल से बाहर निकल जा सकता है। 7.93 km/s से कम वेग होने पर पिंड का पथ दीर्घवृत्त के टुकड़ों जैसा होता है, जिसकी दूरस्थ नाभि पृथ्वी के केंद्र के साथ संपात करती है (चित्र 5a में छिन्न रेखा द्वारा दिखाया गया है)। 7.93 km/s से बहुत कम वेग होने पर गतिमान पिंडों के पथ परवलय के टुकड़ों (चापों) की भाँति माने जा सकते हैं।

यदि कोई पिंड धरातल के साथ कोण α बनाता हुआ 7.93 km/s से बहुत कम के आरंभिक वेग v_0 से प्रक्षिप्त होता है, तो स्वतत्र अभिपातन के त्वरण के मान (मापांक) व उसकी दिशा दोनों को ही स्थिर माना जा सकता है और धरातल को समतल माना जा सकता है। इस स्थिति में पथ परवलयाकार होता है (चित्र 5b); उड़ान की दूरी (s) और ऊपर उठने की महत्तम ऊँचाई (H) निम्न सूत्रों से प्राप्त होते हैं :

$$s = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}, \quad H = \frac{v_0^2 \sin^2\alpha}{2g} \qquad (1.28)$$

उड़ान की एक ही दूरी (परास, range) दो प्रक्षेप-कोणों पर प्राप्त हो सकती है; α_1 व α_2, जिसमें $\alpha_2 = 90° - \alpha_1$। महत्तम दूरी $\alpha = 45°$ के कोण पर प्रक्षेपण से प्राप्त होती है।

हवा के प्रतिरोध के कारण उड़ान की दूरी और उत्थान की ऊँचाई कम हो जाती है। उदाहरणार्थ, $\alpha = 20°$ के कोण पर आरंभिक वेग $v_0 = 550$ m/s से प्रक्षिप्त पिंड वायु-प्रतिरोध की अनुपस्थिति में 19.8 km दूर गिरता है, पर हवा में उड़ता हुआ तोप का गोला इस प्रक्षेप-कोण व प्रक्षेप-वेग पर सिर्फ 8.1 km तय कर पाता है।

सारणी

सारणी *1.* त्वरण (सन्निकट मान)

त्वरित गति	त्वरण m/s²	मंदित गति	त्वरण (ऋण) m/s²
मेट्रो की रेलगाड़ी	1	खतरे के क्षण ब्रेक लगाती कार	4-6
मोटर-रेस की कार	4.5		
घरेलू लिफ्ट	0.9-1.6	उतरता हुआ प्रतिकारी विमान	5-8
यात्री रेलगाड़ी	0.35		
ट्राम	0.6	60 m/s के वेग से गिरता हुआ पैराशूट (पूरी तरह खुल जाने पर)	≈60
राकेट की उड़ान	30-90		
नली में कारतूस	100 000		

सारणी *2.* ग्रहों के गतिकीय परामितक

(T_s = सूर्य के गिर्द परिक्रमण का आवर्तकाल, T_a = अक्ष के गिर्द घूर्णन का आवर्तकाल, v_k = कक्षीय वेग, v = स्वातंत्र्य वेग, N = उपग्रहों की संख्या)

ग्रह	T_s, वर्ष	T_a	v_k, km/s	v, km/s	N
बुध	0.241	59 अहर्निश	48.8	4.3	—
शुक्र	0.615	247±5 अहर्निश	35.0	10.3	—
पृथ्वी	1.00004	23 घ. 56 मि. 4 से.	29.8	11.16	1
मंगल	1.881	24 घं. 37 मि. 22 से.	24.2	5.0	2
बृहस्पति	11.86	9 घं. 51 मि.	13.06	57.5	14
शनि	29.46	10 घं. 14 मि.	9.65	37	10
यूरेनस	84.01	10 घं. 49 मि.	6.78	22	5
वरुण	164.8	15 घं. 40 मि.	5.42	25	2
प्लूटो	250.6	6.4 अहर्निश	4.75	10	?
चाँद (पृथ्वी का उपग्रह)	—	27 अहर्निश 7 घं. 43 मि. 11 से.	1.02	2.37	—

सारणी 3. भिन्न ऊँचाइयों H पर प्रथम व द्वितीय अंतरिक्षी वेग v_1 व v_2

(H– 10^3km में और v_1 व v_2– km/s में)

H	v_1	v_2	H	v_1	v_2	H	v_1	v_2
0	7.9	11.19	5	5.92	8.37	30	3.31	4.68
0.5	7.62	10.77	10	4.93	6.98	40	2.94	4.15
1	7.35	10.40	20	3.89	5.50	50	2.66	3.76
2	6.90	9.76						

सारणी 4. भिन्न ऊँचाइयों H पर कृत्रिम उपग्रहों द्वारा पृथ्वी की परिक्रमा का आवर्तकाल T

(H परिक्रमण की औसत ऊँचाई है; H– km में और T– h में)

H	T	H	T	H	T
0	1.41	1000	1.75	5000	3.35
250	1.49	1500	1.93	10000	5.78
500	1.58	1690	2.00	35800*	23.935
750	1.68	2000	2.12		

* इस ऊँचाई पर उपग्रह का कक्षीय कोणिक वेग धरातल के बिंदुओं के कोणिक वेग जितना होता है, अतः उपग्रह आकाश में अचल लटका हुआ प्रतीत होता है।

B. प्रवेगिकी

मूल अवधारणाएं और नियम

प्रवेगिकी पिंडों की गति के नियमों और गति को उत्पन्न करने वाले तथा उसमें परिवर्तन लाने वाले कारणों का अध्ययन करती है। पिंडों की गति या उसके रूप में परिवर्तन कम से कम दो पिंडों की व्यतिक्रिया (आपसी क्रिया) के कारण होता है।

बल एक भौतिक राशि है, जो पिंडों की व्यतिक्रिया की विशेषता बताता है; वह पिंड की गति में परिवर्तन या उसकी आकृति में परिवर्तन (विकृति) को, या एक ही साथ दोनों को निर्धारित करता है।

बल एक सदिष्ट राशि है। पिंड पर क्रियाशील दो बलों को समांतर चतुर्भुज के नियम से, अर्थात् सदिशों की भांति, जोड़ते हैं।

1. प्रवेगिकी के नियम

न्यूटन का पहला नियम. *पिंड की स्थैर्य अवस्था या समरूप रैखिक गति की अवस्था तब तक बनी रहती है, जब तक उस पर क्रियाशील बल उसकी अवस्था में परिवर्तन नहीं लाते।*

पिंडों में अपने वेग को (मापांक व दिशा में) सुरक्षित रखने का गुण होता है (जब उस पर कोई बल क्रियाशील नहीं होता या जब उस पर क्रियाशील बल आपस में एक दूसरे को संतुलित कर लेते हैं)। इस गुण को **जड़त्व** कहते हैं।

पिंड की गति में परिवर्तन उस पर क्रियाशील बल द्वारा ही नहीं, पिंड के निजी गुणों द्वारा भी निर्धारित होते हैं।

जड़त्व का माप निर्धारित करने वाली भौतिक राशि को **द्रव्यमान** कहते हैं। द्रव्यमान का नाम गुरुत्वाकर्षण के नियम में भी आता है (दे. पृ. 22), जिसमें वह पिंडों की गुरुत्वी व्यतिक्रिया का माप निर्धारित करता है। अतः जड़त्वी व गुरुत्वी द्रव्यमानों में भेद किया जा सकता है। पर सभी प्रायोगिक तथ्य यही बताते हैं कि पिंड का जड़त्वी द्रव्यमान उसके गुरुत्वी द्रव्यमान के बराबर होता है। इसीलिये द्रव्यमान को पिंडों के जड़त्वी व गुरुत्वी दोनों ही गुणों का माप माना जाता है।

न्यूटन का दूसरा नियम. *पिंड पर क्रियाशील बल* **F** *के कारण उत्पन्न त्वरण इस बल का समानुपाती तथा पिंड के द्रव्यमान* m *का व्युत्क्रमानुपाती होता है। त्वरण की दिशा बल की दिशा जैसी होती है :*

$$\mathbf{a} = k \frac{\mathbf{F}}{m} \qquad (1.29)$$

बल या द्रव्यमान की इकाइयां इस प्रकार चुनी जाती हैं कि गुणक k का मान 1 हो जाये।

अ. प्र. में बल की इकाई के रूप में ऐसा बल लिया जाता है, जो 1 kg

द्रव्यमान वाले पिंड को 1 m/s^2 का त्वरण संप्रेषित करता है। इस इकाई का नाम **न्यूटन** (N) है।

यदि पिंड पर एक साथ कई बल क्रियाशील हैं, तो त्वरण परिणामी बल द्वारा निर्धारित होता है, जो पिंड पर क्रियाशील बलों के सदिष्ट योग के बराबर होता है, अर्थात्

$$\mathbf{F}=\mathbf{F}_1+\mathbf{F}_2+\ldots+\mathbf{F}_n \qquad (1.30)$$

पिंड के द्रव्यमान और उसके वेग का गुणनफल **आवेग** (या **गति की मात्रा**) कहलाता है : $\mathbf{p}=m\mathbf{v}$। आवेग एक सदिष्ट राशि है, जिसकी दिशा वेग की दिशा होती है।

बल के उत्पाद और उस अवधि को जिसमें वह कार्य करता है, **संवेग** कहते हैं : $\Delta p=\mathbf{F}\Delta t$। संवेग आवेग में परिवर्तन के बराबर होता है।

आवेग की इकाई किलोग्राम-मीटर प्रति सेकेंड (kg·m/s) है।

न्यूटन के दूसरे नियम को पिंड के आवेग द्वारा भी व्यक्त कर सकते हैं।

$$\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta \mathbf{p}}{\Delta t}=F, \text{ या } \frac{d\mathbf{p}}{dt}=\mathbf{F} \qquad (1.31)$$

जहां $\Delta\mathbf{p}$ = आवेग में परिवर्तन (बल $\mathbf{F}$ के कारण अंतराल Δt में)।

इस प्रकार, इकाई समय में पिंड के आवेग में होने वाला परिवर्तन मापांक और दिशा में क्रियाशील बल के बराबर होता है।

न्यूटन का तीसरा नियम. *दो पिंड जिन बलों से एक दूसरे पर क्रिया करते हैं, वे एक सरल रेखा पर लगते हैं; उनके मापांक बराबर होते हैं, पर उनकी दिशाएं विपरीत होती हैं :*

$$\mathbf{F}_{12}=-F_{21}, \text{ या } m_1\mathbf{a}_1=-m_2\mathbf{a}_2 \qquad (1.32)$$

जहां $\mathbf{F}_{12}$ = प्रथम पिंड पर क्रियाशील बल, $\mathbf{F}_{21}$ = दूसरे पिंड पर क्रियाशील बल, m_1, m_2 = प्रथम व दूसरे पिंड के द्रव्यमान, $\mathbf{a}_1$, $\mathbf{a}_2$ = उनके त्वरण।

न्यूटन के नियम सिर्फ जड़त्वी मापतंत्रों में सही उतरते हैं।

न्यूटन के दूसरे नियम की गणितीय अभिव्यंजना **कण की प्रवेगिकी का मूल समीकरण** कहलाती है :

$$\mathbf{F}=m\mathbf{a} \qquad (1.33)$$

अजड़त्वी तंत्रों में कण की प्रवेगिकी के मूल नियम में बल $\mathbf{F}$ के अतिरिक्त

जड़त्व के बलों को भी ध्यान में रखना पड़ता है। उदाहरणार्थ, यदि अजड़त्वी तंत्र K' अक्ष के गिर्द स्थिर कोणिक वेग ω से घूर्णन कर रहा है और अक्ष K-तंत्र के सापेक्ष त्वरण $\mathbf{a}_0$ के साथ रैखिक (अग्रगामी) गति में रत है, तो K'-तंत्र में त्वरण होगा [दे. (1.27)] :

$$\mathbf{a}'=\mathbf{a}-\mathbf{a}_0+\omega^2\rho+2[\mathbf{v}'\omega], \qquad (1.34)$$

जहां $\mathbf{v}'=K'$-तंत्र के सापेक्ष कण का वेग, $\mathbf{a}=K$-तंत्र में त्वरण। (1.34) को m से गुणा करने पर अजड़त्वी मापतंत्र में कण की गति का मूल समीकरण प्राप्त होता है :

$$m\mathbf{a}'=\mathbf{F}-m\mathbf{a}_0+m\omega^2\rho+2m[\mathbf{v}'\omega], \qquad (1.35)$$

जहां $-m\mathbf{a}_0=\mathbf{F}_\text{J}$ = अजडत्वी मापतंत्र की रैखिक अग्रगामी गति के कारण उत्पन्न **जड़त्व-बल** है, $m\omega^2\rho=\mathbf{F}_{ap}$ = जड़त्व का **अपकेन्द्री** (**केन्द्रापसारी**) बल और $2m\,[\mathbf{v}'\omega]=\mathbf{F}_C$ = **कोरियोलिस-बल**[1]।

जड़त्वी बलों की अपनी विशेषताएं होती हैं : वे पिंडों की व्यतिक्रिया को नहीं दर्शाते; वे अजड़त्वी मापतंत्रों की प्रकृति द्वारा निर्धारित होते हैं। इसीलिये जड़त्वी बलों पर न्यूटन का तीसरा नियम नहीं लागू होता, अर्थात् उनके अनुरूप कोई प्रतिक्रिया बल नहीं दिखाया जा सकता। जड़त्वी तंत्रों में जड़त्व के बल अनुपस्थित रहते हैं। गुरुत्व-बल की तरह जड़त्व-बल भी पिंड के द्रव्यमान के समानुपाती होते हैं। गुरुत्व के समरूप क्षेत्र में भौतिक प्रक्रियाएं उसी प्रकार घटती हैं, जैसे उसी मान वाले जड़त्व-बलों के समरूप क्षेत्र में (सापेक्षिकता के सामान्य सिद्धांत में **समतुल्यता-सिद्धांत**)।

आवेग-संरक्षण का नियम. पिंडों के व्यूह (सिस्टम) पर क्रियाशील बलों को दो समूहों में बांटा जा सकता है — आंतरिक व बाह्य। व्यूह में स्थित पिंडों की व्यतिक्रिया से उत्पन्न बलों को **आंतरिक बल** कहते हैं। व्यूह के बाहर स्थित पिंडों की व्यतिक्रिया से उत्पन्न बलों को **बाह्य बल** कहते हैं। व्यूह को **संवृत** कहते हैं, जब वह बाह्य बलों के प्रभाव से मुक्त रहता है। संवृत व्यूह में **आवेग-संरक्षण का नियम** लागू होता है : संवृत व्यूह में पिंडों के आवेगों का सदिष्ट योगफल एक स्थिर राशि है : $\Sigma \mathbf{p}i=\text{const}$।

---

1. पहली बार 1835 में फ्रांसीसी गणितज्ञ Gaspard de Coriolis (1792-1843) ने इस प्रभाव का वर्णन किया था : घूर्णनरत मापतंत्र से सबद्ध प्रेक्षक को स्वतंत्र गतिमान कण पर अपकेंद्री बल के अतिरिक्त एक और बल लगा हुआ प्रतीत होगा, जो उपरोक्त सूत्र द्वारा निर्धारित होता है।—अनु.

उदाहरणार्थ, दो पिंडों के व्यूह के लिये निम्न संबंध सही है :

$$m_1\mathbf{u}_1+m_2\mathbf{u}_2=m_1\mathbf{v}_1+m_2\mathbf{v}_2$$

जहां $\mathbf{u}_1$ व $\mathbf{u}_2$ प्रथम व दूसरे पिंडों की व्यतिक्रिया से पूर्व के वेग हैं और $\mathbf{v}_1$ व $\mathbf{v}_2$ व्यतिक्रिया के बाद के।

आवेग के संरक्षण का नियम सिर्फ जड़त्वी तंत्रों में सही उतरता है। अजड़त्वी तंत्रों में यह नियम तभी लागू होता है, जब वाह्य बलों का योगफल (जड़त्वी बलों को भी ध्यान में रखें) शून्य के बराबर होता है (जैसे, भार-हीनता की स्थिति में)। इन खास स्थितियों की विशेष प्रकृति होती है।

आवेग-संरक्षण का नियम प्रकृति का एक मूलभूत नियम है। वह यांत्रिक व्यूहों पर ही नहीं, विद्युचुंबकीय विकिरण के अध्ययन में भी लागू होता है (दे. पृ. 203)। अंतिम स्थिति में विद्युचुंबकीय क्षेत्र के फोटोनों के आवेगों को ध्यान में रखना पड़ता है।

रूपांतरण. कम वेगों के लिये (जब $v \ll c$ है) **गैलीलियन रूपांतरण** लागू होते हैं, क्योंकि न्यूटन के नियम सभी जड़त्वी मापतंत्रों के लिये सत्य हैं; ऐसे तंत्रों में द्रव्यमान, त्वरण व बल समान रहते है। जब वेग इतना अधिक हो कि प्रकाश-वेग के साथ उसकी तुलना की जा सके (अर्थात् जब $v \sim c$ हो), तब वेग पर द्रव्यमान की निर्भरता को ध्यान में रखना पड़ता है :

$$m=\frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

जहां m_0=अचल पिंड का द्रव्यमान (स्थैर्य द्रव्यमान), m=गतिमान पिंड का द्रव्यमान, c=निर्वात में प्रकाश-वेग, $\beta=v/c$।

एक जड़त्वी तंत्र से दूसरे में संक्रमण करते वक्त बल $\mathbf{F}$ **लौरेंसी रूपांतरण** के अनुसार रूपांतरित होता है (दे. पृ. 8) : मापतंत्रों के सापेक्षिक वेग के सदिश की लंब दिशा में बल के प्रक्षेप बदल जाते हैं, जबकि उसके समानांतर प्रक्षेप अपरिवर्तित रहते हैं, अर्थात् $\mathbf{F}'_x=\mathbf{F}_x$, $\mathbf{F}'_y=\mathbf{F}_y\sqrt{1-\beta^2}$, $\mathbf{F}'_z=\mathbf{F}_z$ (सापेक्षिक वेग अक्ष Ox के समानांतर है, $Ox \parallel Ox'$, $Oy \parallel Oy'$, $Oz \parallel Oz'$)।

प्रक्षेप अपना महत्तम मान उस तंत्र में रखता है, जिसके सापेक्ष पिंड स्थिर (अचल) रहता है। व्यापक स्थिति में त्वरण व बल के सदिशों की दिशाएं संपात नहीं करतीं।

2. घूर्णन-गति की प्रवेशिकी

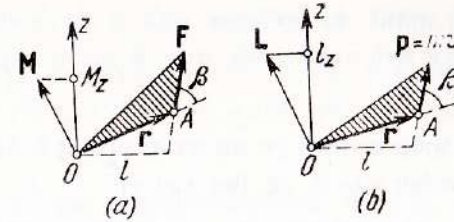
घूर्णन-गति (या चक्रगति) के वर्णन के लिये निम्न अवधारणाओं की आवश्यकता पड़ती है : **बल का आघूर्ण** (बलाघूर्ण), **गतिमात्रा का आघूर्ण, जड़त्व का आघूर्ण** (जड़त्वाघूर्ण)। ये राशियां किसी बिंदु या किसी अक्ष के सापेक्ष निर्धारित की जाती हैं।

बिंदु O के सापेक्ष **बलाघूर्ण** सदिश $\mathbf{M}$ को कहते है (चित्र 6*a*) :

$$\mathbf{M}=[\mathbf{rF}]$$

और उसका मापांक

$$M=Fr\sin\beta \qquad (1.36)$$

जहाँ $\mathbf{r}$=बिंदु A का त्रिज्य सदिश। मापांक $|\mathbf{M}|$ बराबर है बल के मापांक $|\mathbf{F}|$ व उसकी भुजा l के गुणनफल के (बल की भुजा बिंदु O से बल की क्रियारेखा तक की अल्पतम दूरी है, $l=r\sin\beta$, β= $\mathbf{r}$ व $\mathbf{F}$ के बीच का कोण)।

चित्र 6. बलाघूर्ण (*a*) व गतिमात्रा के आघूर्ण (*b*) की परिभाषाओं को दृश्य-सुगम बनाने के लिए आरेख।

कण की **गतिमात्रा का आघूर्ण** (बिंदु O के सापेक्ष) सदिश $\mathbf{L}$ कहलाता है (चित्र 6*b*) :

$$\mathbf{L}=[\mathbf{rp}]$$

और उसका मापांक

$$L=pr\sin\beta \qquad (1.37)$$

जहां $\mathbf{p}=m\mathbf{v}$=कण की गतिमात्रा (या उसका आवेग); मापांक L बराबर है मापांक p गुणा भुजा $l=r\sin\beta$; β= $\mathbf{r}$ व $\mathbf{v}$ के बीच का कोण। (l को **बल की भुजा** कहते हैं।)

बिंदु O के सापेक्ष कण के **जड़त्व का आघूर्ण** (उसका **जड़त्वाघूर्ण**) अदिश राशि mr^2 कहलाती है (m= कण का द्रव्यमान)।

बल के आघूर्ण (बलाघूर्ण) की इकाई न्यूटन-मीटर (N·m) है, गति-मात्रा के आघूर्ण की—किलोग्राम-वर्गमीटर प्रति सेकेंड (kg·m²/s) और जड़त्वाघूर्ण की—किलोग्राम-वर्गमीटर (kg·m²)।

किसी बिंदु के सापेक्ष (गिर्द) **कण की घूर्णन-गति का मूल नियम** इस प्रकार से व्यक्त किया जा सकता है : *गतिमात्रा के आवेश में परिवर्तन की दर कण पर क्रियाशील बल के आघूर्ण के बराबर होती है,* अर्थात्

$$\mathbf{M} = \frac{\Delta \mathbf{L}}{\Delta t}$$

यदि और सही कहें, तो

$$\mathbf{M} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \mathbf{L}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{L}}{dt} \qquad (1.38)$$

इस समीकरण को **आवेगों का समीकरण** कहते हैं। अजड़त्वी मापतंत्रों में आवेग **M** निर्धारित करते वक्त जड़त्वी बलों के आघूर्णों को भी ध्यान में रखना पड़ता है।

अक्ष Oz के सापेक्ष बलाघूर्ण इस अक्ष पर बलाघूर्ण **M** के प्रक्षेप को कहते हैं (इसे M_z से द्योतित करते हैं, (दे. चित्र 6*a*)।)

अक्ष Oz के सापेक्ष गतिमात्रा का आघूर्ण इस अक्ष पर गतिमात्रा के आघूर्ण **L** के प्रक्षेप को कहते हैं। (इसे L_z से द्योतित करते है, (दे. चित्र 6*b*)।)

अक्ष के सापेक्ष (या अक्ष के गिर्द) बल व गतिमात्रा के आघूर्ण बिंदु O के चयन पर नहीं निर्भर करते; ये अदिश राशियां हैं।

उदाहरण—वृत्त की परिधि पर कण की समरूप गति केंद्रोन्मुखी त्वरण द्वारा लंछित (characterised) होती है (जो वेग की दिशा बदलता रहता है) और सिर्फ उस बल की उपस्थिति में कायम रह सकती है, जो इस त्वरण को उत्पन्न करता है। यह बल परिधि पर गतिमान कण पर क्रियाशील रहता है और **केंद्रोन्मुखी बल** कहलाता है। केंद्रोन्मुखी बल का मापांक

$$|\mathbf{F}_c| = \frac{mv^2}{R} = m\omega^2 R. \qquad (1.39)$$

केंद्रोन्मुखी बल की दिशा त्रिज्या के अनुतीर घूर्णनाक्ष की ओर होती है; घूर्णनाक्ष के सापेक्ष उसका आघूर्ण शून्य होता है (क्योंकि इस बल की भुजा l शून्य है)।

ठोस पिंड के घूर्णन की प्रवेगिकी का मूल समीकरण (अचल अक्ष के लिए) :

$$I\varepsilon_z = M_z \qquad (1.40)$$

जहां M_z = घूर्णनाक्ष के सापेक्ष सभी बाह्य बलों का आघूर्ण, ε_z = अक्ष O_z पर कोणिक त्वरण का प्रक्षेप, I = अक्ष O_z के सापेक्ष पिंड के जड़त्व का आघूर्ण।

अक्ष के सापेक्ष ठोस पिंड का जड़त्वाघूर्ण पिंड के सभी कणों के जड़त्वाघूर्णों के योगफल के बराबर होता है। किसी अक्ष के सापेक्ष जड़त्वाघूर्ण I का कलन श्टेइनर के प्रमेय से किया जाता है :

$$I = I_{gk} + mb^2 \qquad (1.41)$$

जहां I_{gk} = पिंड का जड़त्वाघूर्ण, दिये हुए अक्ष के समानांतर और पिंड के गुरुत्व-केंद्र से (दे. पृ. 38) होकर गुजरने वाले अक्ष के सापेक्ष; b = अक्षों की आपसी दूरी।

अक्ष के गिर्द बलों के आघूर्ण बीजगणितीय व्यंजन हैं; इनका चिह्न अक्ष Oz की धनात्मक दिशा के चयन और घूर्णन की दिशा पर निर्भर करता है। घूर्णन की दिशा धनात्मक मानी जाती है, जब कोण मापने की दिशा और अक्ष Oz की दिशा दक्षिण पेंच के नियम से संबद्ध होती है। यदि बल का आघूर्ण कोण φ की दिशा में घूर्णन उत्पन्न करता है (दे. चित्र 3), तो आघूर्ण धनात्मक माना जाता है।

कणों के संवृत्त व्यूह की गतिमात्राओं के आघूर्णों का सदिष्ट योगफल जड़त्वी मापतंत्रों में स्थिर राशि होता है (**गतिमात्रा के आघूर्ण के संरक्षण का नियम**) :

$$\Sigma \mathbf{L}_i = \text{const.} \qquad (1.42)$$

यह नियम अन्य भौतिक प्रक्रियाओं पर भी लागू होता है। आवेग (गतिमात्रा) के आघूर्ण के संरक्षण का नियम भौतिकी के मूलभूत नियमों में से एक है।

3. गुरुत्वाकर्षण का नियम

m_1 व m_2 द्रव्यमान वाले दो कण एक दूसरे को बल

$$F=\gamma \frac{m_1 m_2}{R^2} \qquad (1.43)$$

से आकर्षित करते हैं, जहां R=कणों की आपसी दूरी है और γ=गुरुत्वी स्थिरांक$=6.67\cdot10^{-11}$ $m^3/kg{\cdot}s^2$।

गुरुत्वी स्थिरांक सांख्यिक रूप से परस्पर इकाई दूरी पर स्थित इकाई द्रव्यमान वाले कणों के पारस्परिक गुरुत्वाकर्षण बल के बराबर होता है।

m_1 व m_2 द्रव्यमान वाले दो समांगी (एकरस) गोलों की (गुरुत्वी) व्यतिक्रिया का बल उपरोक्त सूत्र द्वारा ही व्यक्त किया जाता है, सिर्फ इस स्थिति में R गोलों के केंद्रों की आपसी दूरी द्योतित करता है।

धरातल के निकट स्थित m द्रव्यमान वाले पिंड और पृथ्वी के बीच गुरुत्वाकर्षण-बल

$$F=\gamma \frac{Mm}{R^2_{pr}} \qquad (1.44)$$

है, जहां M=पृथ्वी का द्रव्यमान, R_{pr}=पृथ्वी की त्रिज्या।

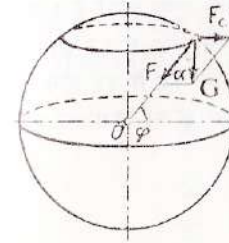
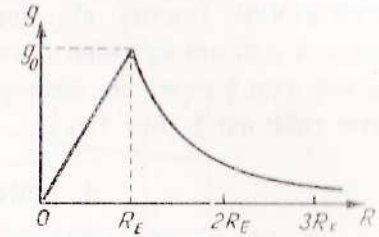
पिंड **गुरुत्वाकर्षण-क्षेत्र** के कारण आकर्षित होते हैं। **गुरुत्वाकर्षण-क्षेत्र की तीव्रता** $\mathbf{G}_g$ एक भौतिक राशि है, जो सांख्यिक रूप से 1 kg द्रव्यमान वाले पिंड पर क्रियाशील बल के बराबर होती है (क्षेत्र के किसी दिये हुए बिंदु पर) : $\mathbf{G}_g=\mathbf{F}/m$।

पृथ्वी के किसी भी दिये हुए बिंदु पर सभी पिंड धरातल के सापेक्ष समान त्वरण से गिरते हैं; स्वतंत्र अभिपातन की स्थिति में त्वरण **g** लगभग $\mathbf{G}_g$ के बराबर होता है।

पृथ्वी की दैनंदिन घूर्णन-गति के कारण त्वरण **g** दो बलों के सदिष्ट योगफल की क्रिया का प्रतिफल होता है— पृथ्वी के आकर्षण-बल **F** [दे. (1.44)] और अपकेंद्री जड़त्व-बल $\mathbf{F}_{ap}=m\omega^2\rho$ [दे. (1.35)] के योगफल से प्राप्त परिणामी बल की क्रिया का। अतः पृथ्वी से संलग्न मापतंत्र अजड़त्वी होगा। परिणामी बल $\mathbf{F}+\mathbf{F}_{ap}=\mathbf{G}$ **गुरुत्व-बल** कहलाता है; स्वतंत्र अभिपातन के त्वरण की दिशा इस परिणामी बल की दिशा के साथ संपात करती है (चित्र 7a)।

m द्रव्यमान वाले पिंड का गुरुत्व-बल निम्न सूत्र से निर्धारित होता है :

$$\mathbf{G}=m\mathbf{g}. \qquad (1.45)$$

गुरुत्व-बल **G** और गुरुत्वाकर्षण-बल **F** के बीच अंतर नगण्य है, क्योंकि दोनों के बीच का कोण α (दे. चित्र 7a) लगभग $0.0018 \sin 2\varphi$ के बराबर है (φ=अक्षांश)।

चित्र 7. (*a*) पृथ्वी के गुरुत्वाकर्षण-बल **F** व गुरुत्व-बल **G** की दिशाएं, (*b*) पृथ्वी के केन्द्र से भिन्न दूरियों पर स्वतंत्र अभिपातन के त्वरण; पृथ्वी को समरूप गोला माना गया है।

भार $\mathbf{P}=\mathbf{G}-m\mathbf{a}$ होता है, जहां a=पृथ्वी के सापेक्ष पिंड का त्वरण (पिंड के साथ-साथ उसके आधार का भी)। यदि $\mathbf{a}=0$, तो $\mathbf{P}=\mathbf{G}$; भारहीनता की अवस्था में $\mathbf{a}=\mathbf{g}$, $\mathbf{P}=0$, लेकिन $\mathbf{G}\neq 0$।

G की दिशा साहुल-रेखा के साथ संपात करती है; गुरुत्वाकर्षण-बल **F** की दिशा हमेशा पृथ्वी के केंद्र की ओर निर्दिष्ट रहती है। इन दोनों बलों की दिशाएं सिर्फ ध्रुवों पर संपात करती हैं, जहां $\mathbf{G}=\mathbf{F}$ है, और विषुवत (विषुवत रेखा) पर भी, जहां $\mathbf{G}=\mathbf{F}-\mathbf{F}_{ap}$ है। इसीलिये (और इसलिये भी कि, पृथ्वी बिल्कुल गोल नहीं है) स्वतंत्र अभिपातन का त्वरण अक्षांश पर निर्भर करता है (दे. सारणी 13)।

स्वतंत्र अभिपातन का त्वरण (गुरुत्वाकर्षण-क्षेत्र की तीव्रता) धरातल से ऊँचाई H पर होगा—

$$g=\gamma \frac{M_{pr}}{(R_{pr}+H)^2}$$

या

$$g = g_0 \frac{R^2_{pr}}{(R_{pr}+H)^2} \quad (1.46)$$

जहां g_0=धरातल (पृथ्वी की सतह) पर त्वरण।

$H \ll R_{pr}$ होने पर प्रथम सन्निकटन में

$$g = g_0\left(1 - 2\frac{H}{R_{pr}}\right). \quad (1.47)$$

पृथ्वी के केंद्र में गुरुत्वाकर्षण के क्षेत्र की तीव्रता शून्य होती है। यदि पृथ्वी को समांगी (एकरस) गोला मान लिया जाये, तो केंद्र से दूर जाने के साथ-साथ g का मान बढ़ने लगेगा। पृथ्वी से परे उसके केंद्र से दूर होने पर g घटने लगता है। पृथ्वी के केंद्र से दूरी R पर त्वरण g की निर्भरता ग्राफ द्वारा दर्शायी गयी है (चित्र 7b)।

4. घर्षण-बल

यदि कोई ठोस पिंड किसी दूसरे ठोस पिंड के सापेक्ष गति कर रहा है और दोनों की सतहें एक दूसरे को स्पर्श कर रही हैं, तो इस गति में बाधा डालने वाला एक बल उत्पन्न हो जाता है। ऐसे बल को **घर्षण का बल** कहते हैं। इसकी उत्पत्ति का कारण घर्षणरत सतहों के खुर्दरेपन और आण्विक व्यतिक्रिया के बलों से समझाया जाता है। यदि ठोस पिंडों की स्पर्शरत सतहों के बीच किसी द्रव की कोई परत नहीं होती, तो इस प्रकार का घर्षण **शुष्क घर्षण** कहलाता है।

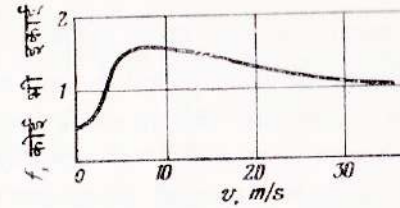
समतल सतह पर विश्रामावस्था में स्थित पिंड पर यदि कोई बल सतह की समानांतर दिशा में लगाया जाये, तो पिंड तब तक गतिमान नहीं होगा, जब तक बल एक नियत मान नहीं ग्रहण कर लेगा। बल का यह मान **स्थैर्य** (विश्रामावस्था) के **घर्षण-बल (स्थैतिक घर्षण-बल)** को निर्धारित करता है।

शुष्क गतिक घर्षण गति की प्रकृति के अनुसार दो प्रकार का होता है—**फिसलन का घर्षण** (जब एक पिंड दूसरे की सतह पर फिसलता है) और **लुढ़कन का घर्षण** (जब एक पिंड दूसरे की सतह पर लुढ़कता है)।

फिसलन का घर्षण-बल F_{gn} निम्न बातों पर निर्भर करता है : घर्षणरत सतहों की प्रकृति, उनके परिष्करण की क्वालिटी और उन्हें आपस में दबा कर रखने वाले बल (**अभिलंबी दाब के बल F_{ab}**) पर, अर्थात्

$$F_{gn} = fF_{ab} \quad (1.48)$$

जहां f=**घर्षण-गुणांक,** जो घर्षणरत सतहों की प्रकृति और उनके परिष्करण की कोटि पर निर्भर करता है। f नगण्य रूप से घर्षणरत पिंडों की सापेक्षिक गति पर भी निर्भर करता है (पर इस निर्भरता की अक्सर उपेक्षा की जाती है)।

स्थैतिक घर्षण के गुणांक f_{st} का मान पिंड पर क्रियाशील बल के परम मान में परिवर्तन के अनुसार बदलता रहता है, पर $0 \leqslant f_{st} \leqslant f$, जहां f=फिसलन का घर्षण-गुणांक।

चित्र 8. इस्पात की सतह पर इस्पात के पत्तर की गति के वेग पर घर्षण-बल की निर्भरता।

चित्र 8 में दिखाया गया वक्र इस्पात की सतह पर इस्पात के पट्टे के घर्षण बल और उसके वेग की पारस्परिक निर्भरता को सन्निकट रूप में दिखाता है। राशि f के मान सारणी 12 में दिये गये हैं।

लुढ़कने की क्रिया में फिसलने की अपेक्षा कम घर्षण होता है। लुढ़कन का घर्षण-बल लुढ़कते पिंड की त्रिज्या R, अभिलंबी दाब के बल और स्पर्शरत सतहों की प्रकृति पर निर्भर करता है :

$$F_{gn} = k\frac{F_{ab}}{R} \quad (1.49)$$

जहां k=स्पर्शरत सतहों की प्रकृति लंछित (कैरेक्टेराइज) करने वाली राशि है; इसकी विमीयता लंबाई है।

उदाहरण के रूप में k के निम्न मान दिये जा रहे (cm में) :

फौलादी पटरी पर फौलाद की किनारी वाले चक्के के लिए : 0.05

फौलादी पटरी पर लोहे के चक्के के लिए : 0.12

5. द्रव्य का घनत्व

द्रव्य का घनत्व ρ एक भौतिक राशि है, जो इकाई आयतन में निहित द्रव्यमान के बराबर होती है। कभी-कभी **भार-घनत्व** नामक राशि प्रयुक्त होती है। भार-घनत्व (ρ_w) एक भौतिक राशि है, जो इकाई आयतन में निहित भार के बराबर होती है। अतः

$$\rho = \frac{m}{V}, \qquad (1.50)$$

$$\rho_w = \frac{G}{V}, \qquad (1.51)$$

जहां m = पिंड का द्रव्यमान, G = उसका भार, V = आयतन।

प्राविधि में विषमांगी (जैसे भुरभुरे) पिंडों के लिए **आयतनी घनत्व** प्रयुक्त होता है। राशि आयतनी घनत्व दिये हुए द्रव्य के इकाई आयतन का द्रव्यमान है। आयतनी घनत्व का कलन करते वक्त भुरभुरे या चूरे हुए द्रव्य में टुकड़ों या दानों के बीच के अवकाश को भी उस द्रव्य के आयतन में समाविष्ट कर लिया जाता है। ऐसे द्रव्यों के उदाहरण हैं: रेत, पत्थर, कोयला, लकड़ी आदि।

घनत्व की इकाई : किलोग्राम प्रति घन मीटर (kg/m^3); भार-घनत्व की इकाई : न्यूटन प्रति घन मीटर (N/m^3)।

द्रव्य का **सापेक्षिक घनत्व** (d) किसी अन्य द्रव्य के घनत्व के साथ उसके घनत्व की तुलना है (अर्थात् दोनों के घनत्वों का अनुपात है)। जब अन्य द्रव्य की जगह 4°C पर स्थित पानी को लिया जाता है, तो सापेक्षिक घनत्व अक्सर **विशिष्ट गुरुत्व** कहलाता है। सापेक्षिक घनत्व (और विशिष्ट गुरुत्व) की विमीयता नहीं होती। यह विमाहीन राशि है।

6. कार्य, शक्ति, ऊर्जा

बल का कार्य (बल द्वारा संपन्न कार्य) एक भौतिक राशि है, जो बल और उसकी दिशा में स्थानांतरण के गुणनफल के बराबर होती है। कार्य एक पिंड द्वारा दूसरे को प्रदत्त गति की माप है। यदि स्थानांतरण **s** बल **F** की दिशा के साथ संपात नहीं करता, तो कार्य

$$A = \mathbf{Fs} = Fs \cos \alpha \qquad (1.52)$$

जहां α = **F** व **s** के बीच का कोण।

कार्य एक बीजगणितीय राशि है; वह धनात्मक हो सकता है (जब $\cos \alpha > 0$) या ऋणात्मक (जब $\cos \alpha < 0$)।

स्थिर बलाघूर्ण M द्वारा पिंड को कोण φ पर घूर्णन देने में संपन्न कार्य

$$A_M = M\varphi \qquad (1.53)$$

शक्ति (Power) इकाई समय में सम्पन्न कार्य है:

$$P = \frac{A}{t} = \mathbf{Fv} \qquad (1.54)$$

जहां **F** = बल, **v** = वेग।

घूर्णनरत पिंड की शक्ति (उसके द्वारा इकाई समय में सम्पन्न कार्य)

$$P_M = M\omega \qquad (1.55)$$

जहां ω = कोणिक वेग, M = बलाघूर्ण।

व्योम के जिस क्षेत्र में किसी नियत नियम के अनुसार परिवर्तनशील कोई बल क्रियारत होता है, उसे **बल का क्षेत्र** कहते हैं। यदि बल का क्षेत्र समय पर निर्भर नहीं करता, तो उसे **स्थावर बलक्षेत्र** कहते हैं।

यदि स्थावर क्षेत्र के किसी भी एक बिंदु से किसी भी दूसरे बिंदु तक स्थानांतरण में बल का कार्य पथ की आकृति पर निर्भर नहीं करता, बल्कि सिर्फ दोनों बिन्दुओं की स्थिति पर निर्भर करता है, तो ऐसा क्षेत्र **स्थितिज क्षेत्र** कहलाता है और बल—**रूढ़ बल**। गुरुत्व-बल व बिन्दु-आवेशों की व्यतिक्रिया के कूलंब-बल (दे. पृ. 96) रूढ़ बलों के उदाहरण है।

घर्षण-बल व प्रतिरोध-बल अरूढ़ होते हैं, इन्हें **क्षयकारी** (dissipating) **बल** कहते हैं। किसी भी व्यूह के सभी आंतरिक क्षयकारी बलों का कुल कार्य सदा ऋणात्मक होता है।

स्थितिज क्षेत्र में भिन्न बिन्दुओं B_i से किसी एक स्थिर बिन्दु O तक कणों के स्थानांतरणों से जो कार्य सम्पन्न होते हैं, वे सिर्फ B_i बिन्दुओं के त्रिज्य सदिशों $\mathbf{r}_i$ पर निर्भर करते हैं। फलन $U(\mathbf{r})$, जो सिर्फ **r** पर निर्भर करता है और **स्थितिज क्षेत्र में कण के स्थानांतरण से सम्पन्न** कार्य को निर्धारित करता है, दिये हुए क्षेत्र में उस कण की **स्थितिज ऊर्जा** कहलाता है। स्थितिज ऊर्जा फलन की स्थिर राशियों तक की परिशुद्धता से निर्धारित की जाती है। स्थितिज क्षेत्र में बल द्वारा सम्पन्न कार्य कण की (उसकी

आरम्भिक व अंतिम स्थितियों में) **स्थितिज ऊर्जाओं** के अन्तर के बराबर होता है।

यांत्रिक ऊर्जा का एक दूसरा प्रकार है—गतिज ऊर्जा। **गतिज ऊर्जा** उस कार्य से निर्धारित होने वाली भौतिक राशि है, जिसे बल गतिमान पिंड को रोकने में सम्पन्न करता है। गतिज ऊर्जा यांत्रिक गति की परिमाणात्मक माप बताती है; वह सापेक्षिक वेग पर निर्भर करती है। वेग v के बहुत कम होने पर (जब अनुपात $v/c=\beta$ का मान इकाई से बहुत कम होता है; $c=$ निर्वात में प्रकाश-वेग), गतिज ऊर्जा (काइनेटिक एनर्जी)

$$E_k=\frac{1}{2}m_0v^2, \qquad (1.56)$$

जहां $m_0=$ पिंड का स्थैर्य द्रव्यमान। वेग अधिक होने पर, जब β का मान इकाई के निकट पहुँचने लगता है, गतिज ऊर्जा

$$E_k=m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}-1\right) \qquad (1.57)$$

व्यूह में उपस्थित सभी कणों की गतिज व स्थितिज ऊर्जाओं का योगफल **व्यूह की पूर्ण यांत्रिक ऊर्जा** कहलाता है।

व्यूह की यांत्रिक ऊर्जा में परिवर्तन सभी वाह्य बलों और सभी आंतरिक क्षयकारी बलों द्वारा सम्पन्न कार्यों के बीजगणितीय योगफल के बराबर होता है :

$$E_2-E_1=A+A_d \qquad (1.58)$$

जहां $E_2=$ व्यूह की ऊर्जा का अंतिम मान, $E_1=$ उसकी आरम्भिक ऊर्जा, $A=$ वाह्य बलों द्वारा सम्पन्न कार्य, $A_d=$ आंतरिक क्षयकारी बलों का कुल कार्य (जो सदा ऋणात्मक है)।

यांत्रिक ऊर्जा के संरक्षण का नियम : *जड़त्वी मापतंत्र में क्षयकारी बल से विहीन संवृत व्यूह की यांत्रिक ऊर्जा सभी गति-प्रक्रियाओं में स्थिर रहती है।*

सर्वसामान्य स्थिति में **ऊर्जा** गति के न सिर्फ यांत्रिक, बल्कि सभी भिन्न रूपों के लिए एकमात्र परिमाणात्मक माप है। ऊर्जा-संरक्षण का नियम ऊर्जा के सभी रूपों के लिए एक मूलभूत प्राकृतिक नियम है; यह ऊर्जा के

सभी रूपों—जैसे यांत्रिक ऊर्जा, आंतरिक ऊर्जा (दे. पृ. 61), नाभिकीय ऊर्जा (दे. पृ. 252) आदि—पर लागू होता है।

ऊर्जा की न तो सृष्टि होती है, न उसका नाश ही; वह एक रूप से दूसरे रूप में परिणत हो सकती है; पदार्थ के भिन्न भागों के बीच ऊर्जा का विनिमय संभव है।

पिंड की गतिज ऊर्जा

$$E_k=\frac{1}{2}mv^2, \qquad (1.59)$$

जहां $m=$ पिंड का द्रव्यमान, $v=$ उसका वेग।

घूर्णनरत पिंड की गतिज ऊर्जा

$$E_k=\frac{1}{2}I\omega^2, \qquad (1.60)$$

जहां $I=$ जड़त्वाघूर्ण, $\omega=$ कोणिक वेग।

पृथ्वी के गुरुत्वाकर्षण-क्षेत्र में पिंड की स्थितिज ऊर्जा

$$E_p=-\gamma\frac{Mm}{R}, \qquad (1.61)$$

जहां $\gamma=$ गुरुत्वी स्थिरांक (दे. पृ. 22), $M=$ पृथ्वी का द्रव्यमान, $m=$ पिंड का द्रव्यमान; $R=$ पृथ्वी के केन्द्र से पिंड के गुरुत्व-केन्द्र की दूरी।

भौतिकी में आकर्षण-बलों की स्थितिज ऊर्जा को ऋणात्मक और विकर्षण-बलों की स्थितिज ऊर्जा को धनात्मक मानने की परम्परा है, इसीलिये समीकरण (1.61) में दायें व्यंजन के पहले ऋण चिह्न लगाया गया है।

पिंड को धरातल से छोटी-मोटी दूरियों पर लाते वक्त पृथ्वी के गुरुत्वाकर्षण-क्षेत्र को समांगी माना जा सकता है (स्वतन्त्र अभिपातन का त्वरण मान व दिशा में स्थिर रहता है)। समांगी क्षेत्र में पिंड की स्थितिज ऊर्जा होगी—

$$E_p=mgh \qquad (1.62)$$

जहां $m=$ पिंड का द्रव्यमान, $g=$ स्वतन्त्र अभिपातन का त्वरण, $h=$ पिंड की उस स्तर (सतह) से ऊँचाई, जिस पर स्थितिज ऊर्जा शून्य मान ली

गयी है। उदाहरण के लिए ऐसे स्तर के रूप में पृथ्वी का तल लिया जा सकता है।

ऊर्जा व कार्य की इकाई—जूल (J); शक्ति की इकाई—वाट (W)। 1 J उस कार्य को कहते हैं, जिसे 1 N का बल पिंड को अग्रगामी गति से 1 m स्थानांतरित करके संपन्न करता है। 1 W ऐसी शक्ति को कहते हैं जिससे 1 s में 1 J कार्य संपन्न होता है।

सारणी 5. ठोस पिंडों के घनत्व (20°C पर)

द्रव्य	ρ, Mg/m^3	द्रव्य	ρ, Mg/m^3
धातु, मिश्र धातु,		पर्म-एलोय	8.6
अर्धचालक		पर्मेंडूर	8.2-8.3
अलुमीनियम	2.7	प्लुटोनियम	19.25
इस्पात	7.7-7.9	प्लैटिनम	21.46
कंस्टैंटेन	8.88	बिस्मथ	9.8
काँसा	8.7-8.9	मैग्नीशियम	1.76
कोबाल्ट	8.8	मैंगनीन	8.5
क्रोमियम	7.15	मोलिब्डेनम	10.2
जर्मेनियम	5.3	युरेनियम	19.1
जस्ता	7.15	रजत	10.5
जिर्कोनियम	6.5	लोहा	7.88
टंग्स्टन	19.34	लोहा, ढलवां	7.0
टैंटेलम	16.6	वेनेडियम	6.02
टिटेनियम	4.5	सिलिकन	2.3
टिन	7.29	सीसा	11.35
ड्युरालुमिन	2.79	सुपेर्म-एलोय	8.87
तांबा	8.93	सोडियम	0.975
थैलियम	11.86	सोना	19.31
थोरियम	11.71		
निकेल	8.9	**लकड़ी (वात-शुष्क)**	
निकेलाइन	8.77		
नियोबियम	8.57	अखरोट	0.6-0.7
पीतल	8.4-8.7	आबनूस	1.1-1.3

(सारणी 5, समापन)

द्रव्य	ρ, Mg/m^3	द्रव्य	ρ, Mg/m^3
कठोर लकड़ी (lignum vitae)	1.1-1.4	संगमर्मर	2.5-2.8
चीड़, स्प्रूस	0.4-0.5	**प्लास्टिक, परतदार**	
देवदार	0.5-0.6	**प्लास्टिक**	
बाँस	0.4		
बालसा	0.12	परतदार एमिनोप्लास्ट	1.4
भोज (भुर्ज)	0.7	परतदार बिनावटी	1.3-1.4
महार्घ (लाल लकड़ी), ऐश	0.6-0.8	(टेक्स्टोलाइट)	
शाह बलूत, बीच	0.7-0.9	पोलीविनील प्लास्टिक	1.34-1.4
		पोलीस्टेरीन	1.06
खनिज		प्लेक्सीग्लास	1.18
		फेनोलिक प्लास्टिक	1.34-1.4
अबरक	2.6-3.2	फ्लोरो प्लास्टिक	2.1-2.4
ऐपेटाइट	3.16-3.22	विनील	1.38-1.4
ऐस्बेस्टस	2.35-2.6	सेलोन	1.3
केओलिनाइट	2.54-2.60		
कैल्साइट	2.6-2.8	**विविध**	
कोरूंडम	4.0		
क्वार्ट्स	2.65	एबोनाइट	1.2
ग्रैफाइट	2.21-2.25	अंबर	1.1
बेरिल	2.67-2.72	काँच, क्वार्ट्स का	2.21
बैराइट	4.48	—, तापरोधक	2.59
हीरा	3.51	—, थर्मामीटर का	2.59
		—, दर्पण का	2.55
शैल-चट्ट (rocks)		—, साधारण	2.5
		चीनी मिट्टी	2.2-2.4
पत्थर कोयला (शुष्क)	1.2-1.5	बर्फ (0 °C पर)	0.917
खल्ली (वात-शुष्क)	2.0	बैकेलाइट वार्निश	1.4
ग्रैनाइट	2.5-3.0	मोम (मधुमक्खी का, सफेद)	0.95-0.96
बैजाल्ट	2.8-3.2	रबड़, कठोर (साधारण)	1.2
बौक्साइट	2.9-3.5	हड्डी	1.8-2.0

सारणी 6. द्रवों के घनत्व (20 °C पर)

द्रव्य	ρ, Mg/m^3	द्रव्य	ρ, Mg/m^3
अम्ल, एसीटिक	1.049	तेल, वैसलीन का (पेट्रोलेटम)	0.8
—, नाइट्रिक	1.51	दूध (औसत वसीयता)	1.03
—, फोर्मिक	1.22	नाइट्रो ग्लीसीरीन	1.6
—, सल्फरिक	1.83	नाइट्रोबेंजीन	1.2
—, हाइड्रोक्लोरिक (38%)	1.19	पानी	0.99823
अल्कोहल, ऐथिल	0.79	—, भारी (D_2O)	1.1086
—, मेथिल	0.792	—, समुद्री	1.01-1.03
एनीलीन	1.02	पारा	13.55
एसीटोन	0.791	पेट्रोल	0.68-0.72
क्लोरोफार्म	1.489	बेंजीन	0.879
ग्लीसीरीन	1.26	ब्रोमीन	3.12
टोलुएन	0.866	हेक्सेन	0.660
तेल, कच्चा	0.76-0.85	हेप्टेन	0.684
—, मशीनी	0.9		

सारणी 7. द्रव-अवस्था में धातुओं के घनत्व

द्रव्य	तापक्रम, °C	ρ, Mg/m^3	द्रव्य	तापक्रम, °C	ρ, Mg/m^3
अलुमीनियम	660 900 1100	2.380 2.315 2.261	लोहा	1530	7.23
टिन	409 574 704	6.834 6.729 6.640	सीसा	400 600 1000	10.51 10.27 9.81
पोटेशियम	64	0.82			
विस्मथ	300 600 962	10.03 9.66 9.20	सोडियम	100 400 700	0.928 0.854 0.780
रजत	960.5 1092 1300	9.30 9.20 9.00	स्वर्ण	1100 1200 1300	17.24 17.12 17.00

सारणी 8. भिन्न तापक्रमों पर जल तथा पारद के घनत्व

t, °C	ρ, Mg/m^3	t, °C	ρ, Mg/m^3	t, °C	ρ, Mg/m^3	t, °C	ρ, Mg/m^3
(a) पानी का घनत्व							
—10	0.99815	6	0.99997	50	0.98807	250	0.794
—5	0.99930	7	0.99993	60	0.98324	300	0.710
0	0.99987	8	0.99988	70	0.97781	350	0.574
1	0.99993	9	0.99981	80	0.97183	374.15*	0.307
2	0.99997	10	0.99973	90	0.96534		
3	0.99999	20	0.99823	100	0.95838		
4	1.00000	30	0.99567	150	0.9173		
5	0.99999	40	0.99224	200	0.8690		
(b) पारद का घनत्व (साधारण दाब पर)							
0	13.5951	25	13.5335	50	13.4723	75	13.4116
5	13.5827	30	13.5212	55	13.4601	80	13.3995
10	13.5704	35	13.5090	60	13.4480	90	13.3753
15	13.5580	40	13.4967	65	13.4358	100	13.3514
20	13.5457	45	13.4845	70	13.4237	300	12.875

* चरम तापक्रम—दे. पृ. 65 व 73.

सारणी 9. गैसों व वाष्पों के घनत्व
(0 °C व साधारण दाब पर)

द्रव्य	ρ, kg/m^3	द्रव्य	ρ, kg/m^3
अमोनिया	0.771	हवा	1.293
आक्सीजन	1.429	हाइड्रोजन	0.08988
आर्गन	1.783	हीलियम	0.1785
ऐसीटीलीन	1.173		
ओजोन	2.139	**संतृप्त वाष्प (0°C पर)**	
कार्बन डायक्साइड	1.977		
कार्बन मोनोक्साइड	1.25	एथिल अल्कोहल	0.033
क्लोरीन	3.22	एथिल ईथर	0.83
क्रिप्टन	3.74	जलवाष्प	0.005
नाइट्रोजन	1.251	बेंजीन	0.012
नियॉन	0.900		

टिप्पणी :—संतृप्त वाष्पों के लिए देखें : अध्याय 2.

सारणी *10*. उपादानों के आयतनी घनत्व (ρ_V)

द्रव्य	ρ_V, kg/m^3	द्रव्य	ρ_V, kg/m^3
आलू (का ढेर)	670	दीवार, सुर्ख ईंटों की	1600-1700
आस्फाल्ट	2120	धातुमल, भट्ठी का	900-1300
ऊनी नमदा	300	—, वातभट्ठों का	600-800
ऐस्बेस्टस का कागज	850-900	पुआल, ताजा	50
— — नमदा	600	—, संपीडित	100
कंक्रीट, छड़दार (प्रबलित); आर्द्रता : भार का 8%	2200	फेन, फौर्मलडीहाइड-यूरिया का (mipora)	20 से अधिक नहीं
—, धातु-मल का; आर्द्रता : भार का 18%	1500	बर्फ के फाहे, ताजे गिरे हुए	80-190
—, फेनिल	300-1200	— — —, संपीडित	200-400
—, रोड़ेदार; आर्द्रता : भार का 8%	2000	बलुआ पत्थर	2600
—, सूखा	1600	बालू	1200-1600
कपड़ा, ऊनी	240	मकई (दाने)	750
—, चौड़े अर्ज का, मोटिया	250	मटर	700
चुकंदर	650	मिट्टी, चिकनी, आर्द्रता : भार का 15-20%	1600-2000
चूना (चूर्ण)	500	रूई, वात-शुष्क	80
चूने का प्लास्टर	1100	रोड़ी, वात-शुष्क	1840
तख्ता, संपीड़ित सरकंडों का	260-360	सिल्क	100
दीवार, सिलिकेट की ईंटों की	1700-1900	सीमेंट (पाउडर)	1400

सारणी *11*. समांगी पिंडों के जड़त्वाघूर्ण

पिंड	घूर्णन का अक्ष	I
l लंबाई का महीन छड़	छड़ के अभिलंब उसके केंद्र से गुजरता है	$\frac{1}{12}ml^2$
r त्रिज्या वाला डिस्क या बेलन	डिस्क के समतल के अभिलंब उसके केंद्र से गुजरता है	$\frac{1}{2}mr^2$
r त्रिज्या का गोला	उसके व्यास के साथ संपात करता है	$0.4\ mr^2$
r त्रिज्या की पतली दीवारों वाली नली या छल्ला	नली के अक्ष के साथ संपात करता है	mr^2
r त्रिज्या व l लंबाई वाला गोल बेलन	बेलन के अक्ष के अभिलंब उसके मध्य से गुजरता है	$m\left(\frac{l^2}{12}+\frac{r^2}{4}\right)$
समकोणिक समानांतर षट-फलक, जिसके माप हैं $2a, 2b, 2c$	केंद्र से होकर $2a$ लंबाई वाली किनारी से गुजरता है	$\frac{m}{3}(b^2+c^2)$

टिप्पणी :—सारणी में जड़त्वाघूर्ण पिंडों के गुरुत्व-केंद्र से गुजरने वाले अक्ष के सापेक्ष दिये गये हैं। किसी अन्य अक्ष के सापेक्ष जड़त्वाघूर्ण सूत्र (1.30) से ज्ञात किये जा सकते हैं। उदाहरणार्थ, पतले छड़ के सिरे से छड़ के अभिलंब गुजरने वाले अक्ष के सापेक्ष छड़ का जड़त्वाघूर्ण होगा :

$$I=\frac{1}{12}ml^2+\frac{1}{4}\ ml^2=\frac{1}{3}ml^2.$$

सारणी 12. भिन्न द्रव्यों के परस्पर फिसलन में घर्षण-गुणांक

स्पर्शरत सतहें	f
इस्पात—इस्पात पर	0.18
,, —ढलवें लोहे पर	0.16
,, —बर्फ पर (स्केट के जूते)	0.02-0.03
,, —लोहे पर	0.19
इस्पात (या ढलवां लोहा)—फेरोडो* व राइबेस्ट* पर	0.25-0.45
इस्पाती टायर वाला चक्का—इस्पात की पटरी पर	0.16
काँसा—इस्पात पर	0.18
,, —काँसे पर	0.2
चमड़े का बेल्ट—बलूत (की लकड़ी) पर	0.27-0.38
चमड़े का बेल्ट, ग्रीस लगा—धातु पर	0.23
,, ,, ,, भीगा— ,, ,,	0.36
,, ,, ,, सूखा— ,, ,,	0.56
ढलवां लोहा—काँसे पर	0.21
,, ,, —ढलवें लोहे पर	0.16
तांबा—ढलवें लोहे पर	0.27
धातु, भीगा—बलूत पर	0.24-0.26
,, सूखा— ,, ,,	0.5-0.6
फ्लोरो प्लास्टिक-4 (टेफ्लोन)—फ्लोरो प्लास्टिक पर	0.052-0.086
फ्लोरो प्लास्टिक—स्टेनलेस स्टील पर	0.064-0.080
बर्फ—बर्फ पर	0.028
बलूत—बलूत पर :	
रेशों के अनुतीर	0.48
एक के रेशों के अनुप्रस्थ व दूसरे के अनुतीर	0.34
बेयरिंग, ससरौवां (स्नेहित)	0.02-0.08
रबड़ (टायर)—कठोर जमीन पर	0.4-0.6
,, ,, —ढलवें लोहे पर	0.83
रस्सी, सन की, भीगी—बलूत पर	0.33
रस्सी, सन की, सूखी— ,, ,,	0.53
लकड़ी की पट्टी (नाव जैसी), बर्फ पर फिसलने के लिये	0.035
वही, लोहे की पत्ती जड़ी	0.02
लकड़ी, सूखी—लकड़ी पर	0.25-0.5

टिप्पणी : तारक-चिह्नित द्रव्य ब्रेक तथा घर्षण प्रयुक्त करने वाले अन्य उपकरणों में काम आते हैं।

सारणी 13. सागर-स्तर पर भिन्न अक्षांशों के लिये पार्थिव गुरुत्वाकर्षण-क्षेत्र की तीव्रता (स्वतंत्र अभिपातन के त्वरण) के मान

अक्षांश	g, m/s²	अक्षांश	g, m/s²
0°	9.78030	55, 45° (मास्को)	9.81523
10°	9.78186	59, 57° (लेनिनग्राद)	9.81908
20°	9.78634	60°	9.81914
30°	9.79321	70°	9.82606
40°	9.80166	80°	9.83058
50°	9.81066	90°	9.83216

सारणी 14. ग्रहों के प्रवेगिक लंछक

(D=सूर्य से दूरी, R=विषुवत रेखा पर ग्रह की त्रिज्या, ρ=ग्रह के द्रव्य का घनत्व, g=ग्रह की सतह पर स्वतंत्र अभिपातन का त्वरण, M=ग्रह का द्रव्यमान)

आकाशीय पिंड	D, 10^{10} m	R, 10^{6} m	ρ, Mg/m³	g, m/s²	M, 10^{24}kg
सूर्य	—	696	1.41	274	$1.99 \cdot 10^{6}$
बुध	5.79	2.43	5.59	3.72	0.33
शुक्र	10.8	6.05	5.22	8.69	4.87
पृथ्वी	14.96	6.378	5.52	9.78	5.976
मंगल	22.8	3.39	3.97	3.72	0.645
बृहस्पति	77.8	70.85	1.30	23.01	1899.3
शनि	142.7	60.1	0.71	9.44	568.4
यूरेनस	286.9	24.6	1.47	9.67	86.8
वरुण	449.7	23.5	2.27	15.0	103
प्लूटो	594.7	2.2	10.4	8.0	1.1
चांद (पृथ्वी का उपग्रह)	0.03844 (पृथ्वी से)	1.737	3.34	1.62	0.0735

C. ठोस पिंडों की स्थैतिकी

मूल अवधारणाएं और नियम

स्थैतिकी पिंड (या पिंडों के व्यूह) के संतुलन की परिस्थितियों का अध्ययन करती है। यदि पिंड पर कई बल लगे हैं, जिनकी दिशाएं एक बिंदु पर एक-दूसरे को काटती हैं, तो पिंड तभी स्थिरावस्था में रह सकता है, जब इन बलों का सदिष्ट योगफल शून्य के बराबर होता है। बल की क्रिया-बिंदु को उसकी क्रिया-रेखा पर कहीं भी रख सकते हैं।

पिंड या कई पिंडों के व्यूह का गुरुत्व-केन्द्र. कणों के किसी भी व्यूह में एक विशेष बिंदु होता है, जो त्रिज्य-सदिश

$$\mathbf{r}_s = \frac{1}{m} \Sigma m_i \mathbf{r}_i \qquad (1.63)$$

द्वारा निर्धारित होता है, जहां m_i व $\mathbf{r}_i$ कणों के द्रव्यमान व त्रिज्य-सदिश हैं, m पूरे व्यूह का द्रव्यमान है। इस बिंदु-विशेष को **जड़त्व-केंद्र** या **द्रव्यमान-केंद्र** कहते हैं।

गुरुत्व-केंद्र एक ऐसा बिंदु है, जिस पर पिंड (या व्यूह) के अलग-अलग कणों पर क्रियाशील सभी गुरुत्व-बलों का परिणामी बल लगता है। गुरुत्व-केंद्र के सापेक्ष पिंड के सभी कणों के गुरुत्व-बलों के आघूर्णों का योग शून्य के बराबर होता है।

गुरुत्व-बलों के समांगी (सम-सर्वत्र या एकरस) क्षेत्र में द्रव्यमान-केंद्र व गुरुत्व-केंद्र संपात करते हैं (एक ही बिंदु पर होते हैं)।

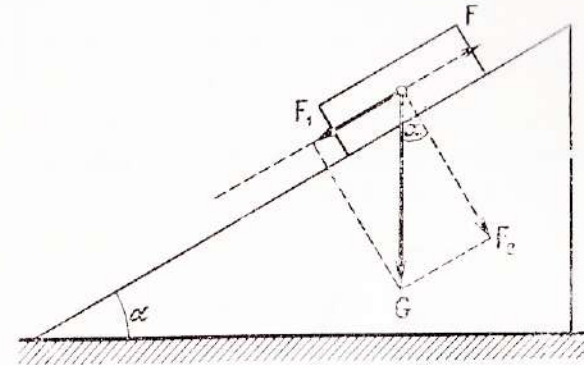
पिंडों के संतुलन के प्रकार. यदि संतुलन की स्थिति से पिंड के थोड़ा-बहुत इधर-उधर होने पर (पर्याप्त अल्प विचलन होने पर) पिंड को आरंभिक स्थिति में लौटाने की प्रवृत्ति रखने वाला कोई बल उत्पन्न हो जाये, तो ऐसे संतुलन को **स्थायी संतुलन** कहते हैं।

स्थायी संतुलन में स्थित पिंड अपनी स्थिति में अल्प खलल (स्थानांतरण, धक्का) के प्रभाव से संतुलन की स्थिति के सापेक्ष अल्प आयाम के साथ दोलन करने लगता है। यह दोलन घर्षण के कारण धीरे-धीरे रुक जाता है (दे. नश्वर या क्षयमान दोलन, पृ. 107) और संतुलन पुनः स्थापित हो जाता है।

स्थायी संतुलन की स्थिति में पिंड की स्थितिज ऊर्जा अल्पतम मान रखती है (रूढ़ बलों की क्रिया के कारण)।

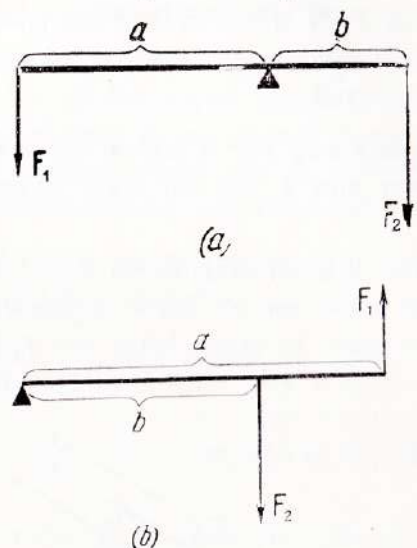
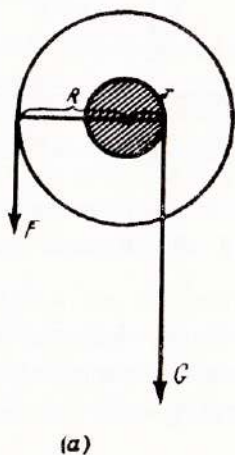
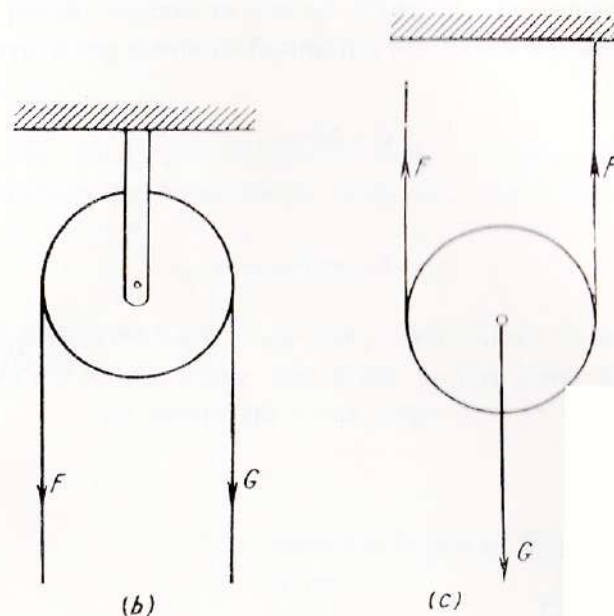
यदि संतुलन की स्थिति से पिंड का अनंत अल्प विचलन होने पर इस विचलन को और बड़ा करने वाले बल उत्पन्न हो जाते हैं, तो ऐसा संतुलन **अस्थायी संतुलन** कहलाता है।

उदासीन संतुलन में स्थित पिंड के विचलित होने पर किसी भी प्रकार का बल नहीं उत्पन्न होता है और नयी स्थिति भी संतुलन की स्थिति होती है।

नत तल पर पिंड के संतुलन की परिस्थितियां. क्षितिज (क्षैतिज तल) के साथ कोण α बनाने वाले नत तल पर पिंड को संतुलित करने के लिये उस पर बल F लगाना पड़ता है, जिसका मापांक बल F_1 के बराबर होना चाहिये और $F_1 = G \sin \alpha$ होना चाहिये। बल F की दिशा नत तल के

चित्र 9. नत तल पर पिंड का संतुलन; $G = mg$ = गुरुत्व-बल (भार)।

अनुतीर ऊपर की ओर होनी चाहिये (चित्र 9)। इस स्थिति में पिंड नत तल को बल $F_2 = G \cos \alpha$ से दबाता है और नत तल भी पिंड पर ऐसे ही बल से क्रिया करता है।

स्वतंत्र पड़ा हुआ पिंड नत तल पर तब तक स्थिरावस्था में रहेगा, जब तक उसे लुढ़काने वाला बल स्थैर्य के घर्षण-बल से अधिक नहीं हो जायेगा। ऐसा तब होगा, जब $t_g\, \alpha > f_{st}$ होगा, जहां f_{st} = स्थैर्य के घर्षण का गुणांक (**स्थैतिक** घर्षण-गुणांक)।

डंडी. डंडी (या **उत्तोलक**) के संतुलन में होने के लिये आवश्यक है कि उस पर क्रियाशील बलों के आघूर्णों का योग शून्य के बराबर हो (चित्र 10),

चित्र 10. उत्तोलक : a—टेक-बिंदु उत्तोलक पर लगे बलों के क्रिया-बिंदुओं के बीच में है; b—बलों के क्रिया बिंदु-टेक के एक ओर हैं।

चित्र 11. a—बेलन-चरखा का आरेख।

चित्र 11. b—स्थिर घीरी और c—गतिमान घीरी।

अर्थात्

$$F_1 a - F_2 b = 0$$

जहां a व b बल F_1 व F_2 की भुजाएं हैं (दे. पृ. 19)।

बलाघूर्णों का बराबर होना बेलन-चरखा[1] के संतुलन के लिये भी आवश्यक शर्त है (चित्र 11a)।

घीरी. अचल घीरी (चित्र 11b) सिर्फ क्रियाशील बल की दिशा बदलने के काम आती है।

चल घीरी (चित्र 11c) से बल-लाभ भी मिलता है। स्थिर (रुकी

---

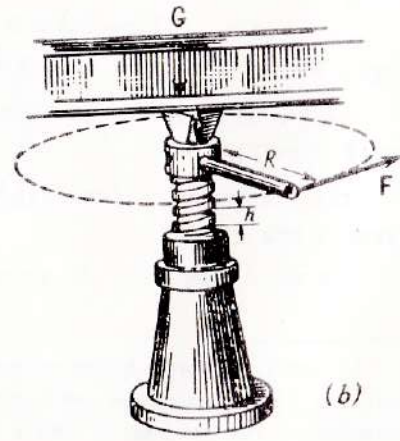
1. कुएं से पानी भरने के लिये एक उपकरण। एक ही अक्ष पर एक बेलन व एक चक्का लगा होता है; बेलन का व्यास चक्के के व्यास से कम होता है। चक्के की किनारी पर लगे हत्थे को पकड़ उसे घुमाने से बेलन के साथ बंधी रस्सी बेलन पर लिपटती हुई बाल्टी को ऊपर उठाने लगती है।—अनु.

हुई) या समरूप गति से घूर्णनरत चल घीरी पर क्रियाशील सभी बलों का योगफल तथा उस पर क्रियाशील सभी बलाघूर्णों का योगफल शून्य के बराबर होता है :

$$G+2F=0,$$

अतः

$$G=2F, \text{ या } F=\frac{1}{2}G.$$

बहुघीरी. बहुघीरी (चित्र 12a) चल व अचल घीरियों का व्यूह है, जो एक ही विन्यास द्वारा जुड़े होते हैं। यदि बहुघीरी में n चल व n अचल घीरियां हैं, तो बल G को संतुलित करने के लिये आवश्यक बल

चित्र 12. बहुघीरी (a) और पेंच (b)

$$F=\frac{G}{2n}$$

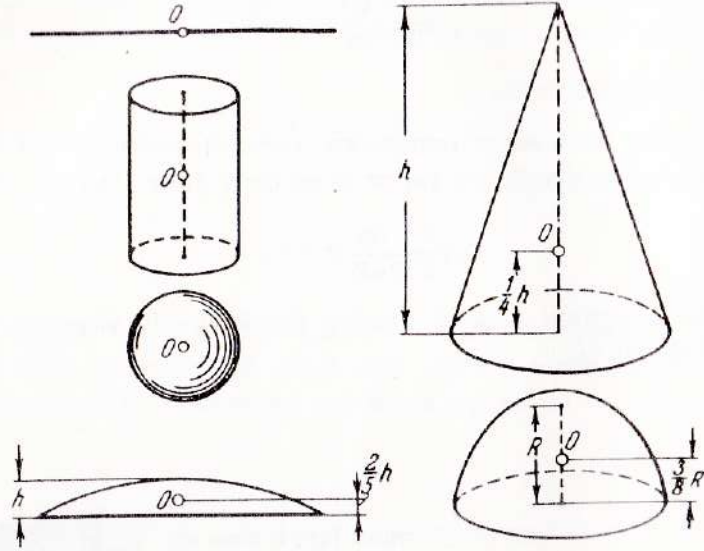
की आवश्यकता पड़ेगी।

पेंच. पेंच के अक्ष पर क्रियाशील बल G घर्षण की अनुपस्थिति में बल F द्वारा संतुलित होता है, जिसे हत्थे पर लगाया गया है (चित्र 12b) :

$$F=\frac{Gh}{2\pi R},$$

जहां R = घूर्णनाक्ष से बल के क्रियाबिंदु की दूरी, h = पेंच की दो चूड़ियों के बीच की दूरी।

सारणी *15*. **समरूप पिंडों के गुरुत्व-केंद्र**
(दे. चित्र 13)

पिंड	गुरुत्व केंद्र का स्थान
पतला छड़	छड़ के मध्य में
बेलन या प्रिज्म	बेलन या प्रिज्म के आधारों के केंद्रों को मिलाने वाली रेखा के मध्य में
गोला	केंद्र में
पतला व चपटा चाप	सममिति-अक्ष पर आधार से उसकी ऊंचाई के 2/5 भाग ऊपर
पिरामिड या शंकु	शीर्ष व आधार-केंद्र को मिलाने वाले रेखाखंड पर; आधार से इस रेखाखंड के 1/4 भाग ऊपर
अर्धगोला	सममिति-अक्ष पर, केंद्र से 3/8 त्रिज्या ऊपर
पतली त्रिकोण समतल पट्टी	मध्यरेखाओं का कटान-बिंदु

चित्र 13. नियमित ज्यामितिक रूप वाले पिंडों के गुरुत्व-केंद्र।

D. प्रत्यास्थता-सिद्धांत के तत्व

मूल अवधारणाएं और नियम

बाह्य बलों या अन्य कारकों (जैसे तपन) के प्रभाव से पिंड के बिंदुओं के बीच की दूरी में परिवर्तन को **विकृति (या अपरूपण)** कहते हैं। विकृति को पिंड या उसके किसी भाग की आकृति, उसके आकार आदि में परिवर्तन द्वारा भी निर्धारित कर सकते है।

यदि बाह्य बल की क्रिया समाप्त होने पर विकृति गायब हो जाती है, तो ऐसी विकृति को **प्रत्यास्थी** कहते है। प्रत्यास्थी विकृति से युक्त पिंड में **प्रत्यास्थता-बल** या **प्रत्यास्थी बल** उत्पन्न हो जाते है, जो पिंड के आकृति-परिवर्तन में बाधा डालते हैं। *प्रत्यास्थी विकृति की स्थिति में प्रत्यास्थता-बल विकृति के समानुपाती होते हैं* **(हूक का नियम)**।

यदि प्रत्यास्थी बल F क्षेत्र S पर वितरित है, तो राशि $\sigma=F/S$ **प्रतिबल (दाब)** कहलाती है।

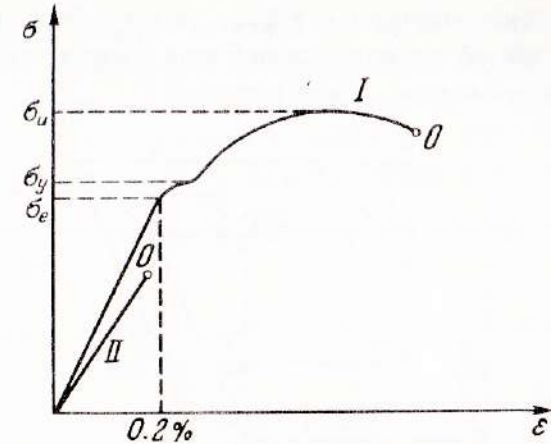
अनुतीर विकृति. अक्ष के अनुतीर छड़ का लमड़ना या सिकुड़ना विकृति का सरलतम रूप है। छड़ की लंबाई में परिवर्तन Δl और इससे उत्पन्न प्रत्यस्थता-बल F निम्न संबंध द्वारा जुड़े होते है :

$$\Delta l = lF/(ES), \qquad (1.64)$$

जहां S व l विकृतिपूर्व छड़ के अनुप्रस्थ-काट का क्षेत्रफल व उसकी लंबाई है, F मापांक में बाह्य बल के बराबर है, $1/E$ = समानुपातिकता-गुणांक है। E को **अनुतीर प्रत्यास्थता का मापांक** या **यंग का मापांक** कहते है। अनुपात $\Delta l/l=\varepsilon$ **सापेक्षिक अनुतीर विकृति** (या सिर्फ **अनुतीर विकृति**) कहलाता है।

सूत्र (1.64) हूक के नियम को अनुतीर विकृति के लिए व्यक्त करता है। अनुतीर विकृति के लिये हूक के नियम को निम्न रूप में लिखा जा सकता है :

$$\sigma = E\varepsilon. \qquad (1.65)$$

यंग का मापांक सांख्यिक रूप से उस तनाव के बराबर होता है, जो अक्सर नमूने की लंबाई को दो गुना बढ़ा देता है। लेकिन नमूना इससे बहुत कम प्रतिबल पर ही टूट जाता है।

चित्र 14. सापेक्षिक अनुतीरी विकृति पर प्रतिबल की निर्भरता। वक्र I सुनम्य द्रव्य के लिये है, वक्र II भंगुर द्रव्य के लिये। बिंदु O पर द्रव्य चूर हो जाता है।

चित्र 14 में ε पर σ की प्रायोगिक निर्भरता का ग्राफ दिखाया गया है, जिसमें

σ_m = दृढ़ता-सीमा, अर्थात् ऐसा प्रतिबल, जिसके कारण छड़ पर स्थानीय संकोचन होता है (लमड़ कर गरदन सा पतला हो जाता है),

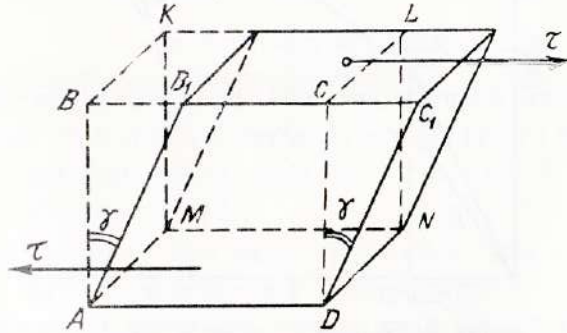
σ_s = सुनम्यता की सीमा = जिस प्रतिबल पर प्रवाहिता उत्पन्न हो जाती है (विकारक बल को बढ़ाये बिना ही विकृति बढ़ने लगती है),

σ_{pr} = प्रत्यास्थता-सीमा, अर्थात् ऐसा प्रतिबल जिससे कम प्रतिबल होने पर हूक का नियम लागू होता है।[1]

प्रत्यास्थता-मापांक उपरोक्त वक्र के रैखिक भाग के नतन-कोण की स्पर्शज्या के बराबर है (चित्र 14)।

द्रव्य भंगुर होते हैं या सुनम्य। भंगुर द्रव्य बहुत कम लमड़न से ही चूर होने लगते हैं, पर संपीडन वे कहीं अधिक मात्रा में सहन कर सकते है।

अनुतीर विकृति के साथ-साथ छड़ के व्यास d में भी परिवर्तन (Δd) होता है (व्यास लमडन से घटता है और संपीडन से बढ़ता है); अनुपात $\Delta d/d = \varepsilon_1$ **सापेक्षिक अनुप्रस्थ विकृति** कहलाता है; अनुपात $\varepsilon_1/\varepsilon = \mu$ **पुआसोन-गुणांक** कहलाता है; μ का मान 0.1 से 0.5 की सीमा में बदलता है।

सर्पन-विकृति. विकृतिमान पिंड में दो प्रकार के प्रतिबल उत्पन्न हो सकते हैं—**अभिलंबी और सर्पक**; अभिलंबी तनाव σ सतह पर लंबवत क्रिया करता है और सर्पक तनाव τ—सतह के समानांतर।[2]

चित्र 15. विकृतिःसरल सर्पन।

1. बल समय के अत्यंत अल्प अंतराल में लागू माना गया है।

2. इस विकृति में पिंड की सभी समानांतर परतें एक दूसरी पर सरकने (सर्पन) की प्रवृत्ति रखती है। —अनु.

सर्पक तनावों की क्रिया से घनाकार आयतन $ABCDKLMN$ वाले क्षुद्र (अति-अल्प) मूलांश की विकृति चित्र 15 में दिखायी गयी है। अभिलंबी तनावों की अनुपस्थिति में किनारी AB, BC आदि की लंबाइयां नहीं बदलती हैं, पर फलक $ABCD$ वर्ग से समचतुर्भुज AB_1C_1D में परिणत हो जाता है। शीर्ष A पर 90° का कोण था, विकृति के बाद वह $90^\circ - \gamma$ हो जाता है और शीर्ष B पर का कोण विकृति के बाद $90^\circ + \gamma$ के बराबर हो जाता है।

कोण γ अपरूपण का माप है; इसे **सर्पन-विकृति** कहते हैं। सर्पन-विकृति मूलांश की एक किनारी के स्थानांतरण (दूसरी समानांतर किनारी के सापेक्ष) और इन किनारियों के बीच की दूरी का अनुपात है, अर्थात् $\gamma = BB_1/AB$। स्थानांतरण BB_1 **परम सर्पन** कहलाता है।

सर्पन-विकृतियों के लिए हूक का नियम निम्न रूप में लिखा जाता है:

$$\tau = G\gamma, \qquad (1.66)$$

जहां G = **सर्पन का मापांक**।

द्रव्य की संपीड्यता. सब तरफ से पिंड का संपीडन करने से पिंड के आयतन में ΔV की कमी आ जाती है और पिंड में प्रत्यास्थी बल उत्पन्न होते हैं, जो उसका आरंभिक आयतन लौटाने की कोशिश करते है। क्रियाशील दाब Δp में इकाई परिवर्तन के कारण पिंड के आयतन में होने वाले सापेक्षिक परिवर्तन $\Delta V/V$ का सांख्यिक मान **संपीड्यता** β कहलाता है।

संपीड्यता की व्युत्क्रम राशि **व्यौम (आयतनी) प्रत्यास्थता का मापांक** K कहलाती है।

सब तरफ से दाब में Δp की वृद्धि के कारण पिंड के आयतन में वृद्धि ΔV निम्न सूत्र से ज्ञात किया जाता है:

$$\Delta V = -V\beta\Delta p, \qquad (1.67)$$

जहां V पिंड का आरंभिक आयतन है।

प्रत्यास्थता-स्थिरांकों के पारस्परिक संबंध. युग-मापांक E, पुआसोन-गुणांक μ, व्यौम प्रत्यास्थता-मापांक K और सर्पन-मापांक G निम्न समीकरणों से संबंधित हैं:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}, \qquad (1.68)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)} \qquad (1.69)$$

यदि दो मापांक ज्ञात हैं, तो इन समीकरणों की सहायता से प्रथम सन्निकटन में अन्यों के मान ज्ञात किये जा सकते हैं।

प्रत्यास्थ विकृति की स्थितिज ऊर्जा होगी

$$E_{st} = \tfrac{1}{2} F_{pr} \Delta l, \qquad (1.70)$$

जहां F_{pr}=प्रत्यास्थता-बल, Δl=परम विकृति। सभी प्रत्यास्थता-मापांक पास्कल (Pa) में व्यक्त किये जाते हैं; यांत्रिक तनाव व दाब भी पास्कल में व्यक्त होते हैं (दे. पृ. 53)।

सारणी और ग्राफ

सारणी 16. **चंद द्रव्यों की दृढ़ता-सीमाएं**

द्रव्य	दृढ़ता-सीमा, MPa में	
	लमड़न में	संपीडन में
इस्पात, इमारती	373-412	—
— , कार्बन युक्त	314-785	—
— , Si-Cr-Mn युक्त	1520	—
ईंट	—	7-29
एमिनोप्लास्ट, परतदार	78	196
कंक्रीट	—	4.9-34
गेटीनैक्स (परतदार कठोर गत्ता)	147-167	147-177
ग्रैनाइट	2.9	147-255
चीड़ (15% आर्द्रता)		
रेशों के अनुतीर	78	39
— — अनुप्रस्थ	—	4.9
पीतल, काँसा	216-490	—
पोली एक्रिलेट (जैव काँच)	49	68.6
पोलीस्टेरीन	39	98
फेनिल प्लास्टिक (के तख्ते)	0.59	—
बर्फ (0°C पर)	1	1-2
बलूत (15% आर्द्रता)		
रेशों के अनुतीर	93	49
— — अनुप्रस्थ	—	14.7
बैकेलाइट (कृत्रिम रबड़)	19.6-29.4	78-98
विनील प्लास्टिक (के तख्ते)	39	78

(सारणी 16, समापन)

सारणी 17. **प्रत्यास्थता के मापांक व पुआसोन का गुणांक**

द्रव्य	यंग-मापांक, GPa	सर्पन-मापांक GPa	पुआसोन-गुणांक
अलुमीनियम	63-70	25-26	0.32-0.36
इनवार	135	55	0.25*
इस्पात, एलोय	206	80	0.25-0.30
— , कार्बन युक्त	195-205	8	0.24-0.28
— , ढलवां (ढल्लू)	170	—	—
कंक्रीट	15-40	7-17	0.1-0.15
कांस्टैंटेन	160	61	0.33
कांच	49-78	17.5-29	0.2-0.3
कांसा, फोस्फर युक्त	113	41	0.32-0.35
— , अलुमिनियम युक्त (ढल्लू)	103	41	0.25*
कैडमियम	50	19*	0.3

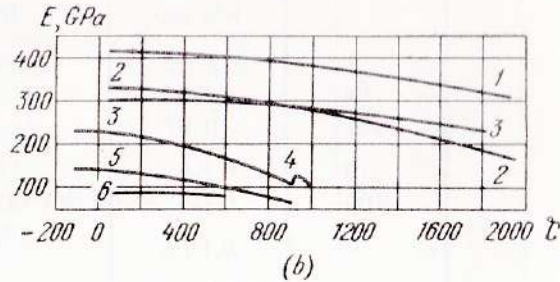
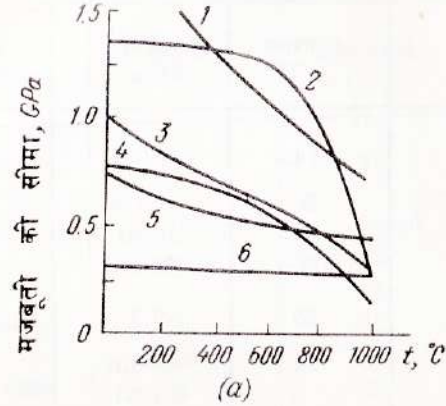
(सारणी 17, समापन)

द्रव्य	यंग-मापांक, GPa	सर्पन-मापांक GPa	पुआसोन-गुणांक
क्वार्टस का महीन तार, संगलित रूप में	73	31	0.17
ग्रेनाइट, संगमर्मर	35-50	14-44	0.1-0.15
चांदी	82.7	30.3	0.37*
चूना, घना	35	15	0.2
जस्ता, बेलित (बेल्लू)	82	31	0.27
टिटैनियम	116	44	0.32*
डुरालुमीनियम, बेलित	70	26	0.31*
तांबा, अतप्त कर्षित	127	48	0.33*
— , ढलवां	82	—	—
— , बेलित	108	39	0.31-0.34
निकेल	204	79	0.28*
पीतल, अतप्त कर्षित	89-97	34-36	0.32-0.42
— , बेल्लू (जहाज बनाने के लिये)	98	36*	0.36
प्लेक्सी ग्लास	5.25	1.48	0.35*
बिस्मथ	32	12*	0.33*
मैंगेनीन	123	46	0.33
रबर, कच्चा	0.008	0.003	0.46
— , वल्कित	0.0015-0.005	0.0005-0.0015	0.46-0.49
लोहा, पिटवां (पिट्टू)	150	—	—
— , सफेद, भूरा	113-116	44	0.23-0.27
सेलुलायड	1.7-1.9	0.65	0 39

* कलित (सैद्धांतिक) मान

सारणी *18.* द्रव व ठोस पिंडों की संपीड्यता

द्रव्य	तापक्रम, °C	दाब-सीमा, MPa	संपीड्यता, 10^{-11} Pa^{-1}
अंडी का तेल	14.8	0.1-1	47.7
एथिल अल्कोहल	20	0.1-5	113
	20	20-40	84
	100	90-100	74
एसीटिक अम्ल	25	9.3	82.2
एसीटोन	14.2	0.9-3.6	112
	0	0.1-50	83
	0	100-200	48
किरासीन	1	0.1-1.5	68-92
	94	0.1-1.5	110
	185	0-10	110
क्सीलीन	10	0.1-5	75
	100	0.1-5	133
गंधकाम्ल	0	0.1-1.6	305.3
ग्लीसीरीन	14.8	0.1-1	22.3
जैतून का तेल	20	0.1-1	64
पानी	20	0.1-10	47
	20	50-100	38
	100	10-20	74
	100	50-100	61
पारा	20	0.1-1	3.96
चांदी	20		1.0
टिन	20		1.8
तांबा	20		0.74
लोहा	20		0.59
हीरा	20		0.23

तापक्रम पर दृढ़ता-सीमा और यंग-मापांक की निर्भरता

चित्र 16. (*a*) तापक्रम पर दृढ़ता-सीमा की निर्भरता: 1—टंग्स्टन; 2—निकेल-इस्पात; 3—कोबाल्ट-इस्पात; 4—इस्पात N-155; 5—मिश्रधातु Mo 0.5 Ti; 6—मिश्रधातु Ti 36 Al; (*b*) तापक्रम पर यंग-मापांक की निर्भरता; 1—टंग्स्टन; 2—मोलिब्डेनम; 3—सिलिकन कार्बाइड; 4—लोहा; 5—तांबा; 6—कांच।

E. तरल पिंडों की यांत्रिकी

मूल अवधारणाएं और नियम

आयतन स्थिर रहने पर द्रव व गैस (**तरल** पदार्थ) ठोस पिंडों की तरह आकृति-परिवर्तन का प्रतिरोध नहीं करते। द्रव के आयतन में परिवर्तन या गैस के आयतन में कमी लाने के लिये बाह्य बल लगाना पड़ता है। तरल पिंडों के इस गुण को **आयतनी प्रत्यास्थता** कहते हैं।

दाब (p) एक ऐसी राशि है, जो इकाई क्षेत्र पर सतह के अभिलंब क्रियाशील बल द्वारा नापी जाती है। दाब की इकाई **पास्कल** (Pa) है। 1 m^3 क्षेत्र पर लंब रूप से सम-सर्वत्र वितरित 1N का बल 1Pa के बराबर दाब उत्पन्न करता है।

1. स्थैतिकी

द्रव या गैस पर क्रियाशील बाह्य दाब सब ओर समान रूप से प्रसारित होता है (**पास्कल का नियम**)।

सम-सर्वत्र गुरुत्वाकर्षण-क्षेत्र में स्थित द्रव या गैस का स्तंभ अपने भार के कारण दाब उत्पन्न करता है। यदि द्रव व गैस को असंपिड्य मान लिया जाये, तो यह दाब होगा

$$p = \rho g h, \qquad (1.71)$$

जहां ρ = द्रव या गैस का घनत्व, g = स्वतंत्र अभिपातन का त्वरण, h = स्तंभ की ऊंचाई।

दाब p स्तंभ की आकृति पर निर्भर नहीं करता, वह स्तंभ की सिर्फ ऊंचाई से निर्धारित होता है।

संचारी (नलियों द्वारा जुड़े हुए) बरतनों में द्रव-स्तंभों की ऊँचाइयां द्रवों के घनत्वों की व्युत्क्रमानुपाती होती हैं :

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \qquad (1.72)$$

द्रव या गैस में डुबाये गये पिंड पर एक उत्प्लावक बल लगता है, जो मान में पिंड द्वारा विस्थापित द्रव या गैस के भार के बराबर होता है (**आर्कमेडिस का नियम**)।

2. प्रवेगिकी

यदि गतिमान तरल की क्षिप्रता उस तरल में ध्वनि की क्षिप्रता से बहुत कम होती है, तो उसकी संपीड्यता की उपेक्षा की जा सकती है। तरल की गति के कारण घर्षण-बल उत्पन्न होते हैं। यदि ये बल बड़े नहीं होते, तो उन्हें नगण्य मान कर उनकी उपेक्षा की जाती है और विचाराधीन तरल को **आदर्श तरल** की संज्ञा दी जाती है। यदि घर्षण-बल नगण्य नहीं होते, तो विचाराधीन तरल **यथार्थ** (**श्यान, चिपचिपा**) **तरल** कहलाते हैं।

आदर्श तरल की गति. द्रव या गैस के प्रवाह को **थिर प्रवाह** कहते हैं, यदि प्रवाहधारी व्योम के हर बिंदु पर वेग व दाब स्थिर (अचल) रहते हैं।

इस स्थिति में नली के किसी भी अनुप्रस्थ काट से होकर इकाई समय में सिर्फ तुल्य आयतन का तरल गुजरता है :

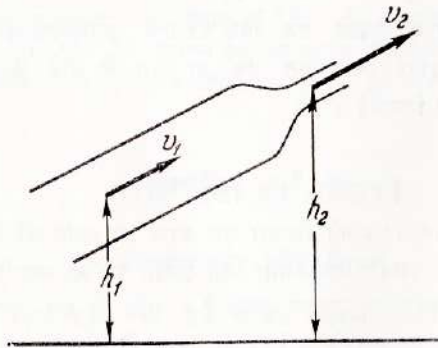
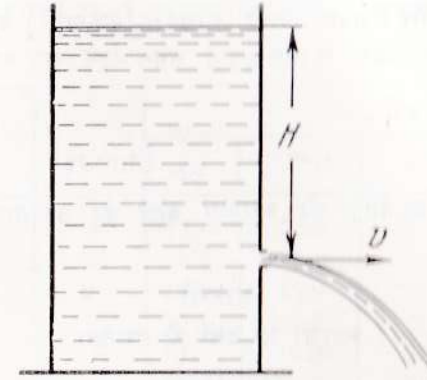
$$S_1 v_1 = S_2 v_2 \qquad (1.73)$$

जहां S_1 व S_2 नली के दो भिन्न अनुप्रस्थ काटों के क्षेत्रफल हैं और v_1 व v_2 —इन अनुप्रस्थ काटों पर तरल का वेग है। नली के काट में परिवर्तन के कारण गतिमान तरल के वेग में ही नहीं, दाब में भी परिवर्तन होता है। ये परिवर्तन इस प्रकार से होते हैं कि (आदर्श तरल की थिर गति में) :

$$\left.\begin{array}{l} p+\rho g h+\frac{1}{2}\rho v^2=\text{const}, \\ \text{या} \quad p_1+\rho g h_1+\frac{1}{2}\rho v_1^2=p_2+\rho g h_2+\frac{1}{2}\rho v_2^2 \end{array}\right\} \qquad (1.74)$$

जहां p = दाब, ρ = तरल का घनत्व, h = किसी स्तर से नली के विचाराधीन काट की ऊँचाई, v = नली के विचाराधीन काट पर तरल का वेग (चित्र 17a)।

समीकरण (1.74) को **बर्नूली का समीकरण** कहते हैं। इस समीकरण से **टोरीसेली का नियम** निकलता है :

$$v^2 = 2gH, \qquad (1.75)$$

चित्र 17. (a) सूत्र (1.74) का स्पष्टीकरण।

चित्र 17. (b) नन्हें रंध्र से द्रव का बहना।

जहां v = बरतन के नन्हे छेद से बहते तरल के कणों का वेग, H = छेद से ऊपर तरल के स्तर की ऊँचाई (चित्र 17b)।

श्यान तरल की गति. तरल (द्रव या गैस) में गतिमान पिंड (जैसे गोला) के साथ तरल की निकटवर्ती परतें चिपक जाया करती हैं और अन्य परतें एक-दूसरे के सापेक्ष फिसलती रहती हैं। श्यान माध्यम (द्रव या गैस) में गतिमान ठोस पिंड पर उसके वेग के विपरीत लागू बल **माध्यम का प्रतिरोध** कहलाता है। यदि गति के कारण पिंड के पीछे-पीछे भंवर नहीं बनते, तो माध्यम का प्रतिरोध पिंड के वेग v का समानुपाती होगा। विशेषतः R त्रिज्या वाले गोले के लिये माध्यम का प्रतिरोध होगा

$$F = 6\pi\eta R v \qquad (1.76)$$

जहां η = **आंतरिक घर्षण का गुणांक** (दे. पृ. 68) या **श्यानता**।

आंतरिक घर्षण के गुणांक की इकाई पास्कल-सेकेंड (Pa·s) है (दे. पृ. 68); संबंध (1.76) को **स्टोक्स का सूत्र** कहते हैं।

श्यान तरल में छोटी सी गोली के समरूपता से गिरने का वेग निम्न सूत्र द्वारा निर्धारित होता है :

$$v = g\,\frac{\rho-\rho_{\text{त}}}{\eta}\,\frac{2R^2}{g}, \qquad (1.77)$$

जहां ρ = गोली का घनत्व, R = उसकी त्रिज्या, $\rho_{\text{त}}$ = तरल का घनत्व, η = उसकी श्यानता, g = स्वतंत्र अभिपातन का त्वरण।

R त्रिज्या और l लंबाई वाली केशिका (केश-नली) के सिरों पर दाब p_1-p_2 होने पर केशिका से प्रति इकाई समय बहने वाले तरल का आयतन होगा

$$V=\frac{1}{\eta}\ \frac{\pi R^4}{8l}\ (p_1-p_2) \qquad (1.78)$$

तरल (द्रव या गैस) की श्यानता बहुत हद तक तापक्रम पर निर्भर करती है।

सारणी

सारणी 19. द्रवों की श्यानता

(18 °C पर)

द्रव्य	η, 10^{-2} Pa·s	द्रव्य	η, 10^{-2} Pa·s
एथिल ईथर	0.0238	तेल, अंडी का	120.0
एथिल अल्कोहल	0.122	—, मशीनी, भारी	66.0
एनीलीन	0.46	—, —, हल्का	11.3
एसीटोन	0.0337	पानी	0.105
एसीटिक अम्ल	0.127	पारा	0.159
कार्बन डायसल्फाइड	0.0382	पेंटेन	0.0244
क्लोरोफोर्म	0.0579	बेंजोल	0.0673
क्सीलीन	0.0647	ब्रोमीन	0.102
ग्लीसीरीन	139.3	सिलिंडर आयल, काला	24.0
टुलुएन	0.0613	— —, शोधित (40°C)	0.109

सारणी 20. गैसों की श्यानता साधारण परिस्थितियों में

द्रव्य	η, 10^{-5} Pa·s	द्रव्य	η, 10^{-5} Pa·s
अमोनिया	0.93	नाइट्रोजन	1.67
आक्सीजन	1.92	— मोनोक्साइड	1.72
कार्बन डायक्साइड	1.40	मिथेन	1.04
— मोनोक्साइड	1.67	हवा (CO_2 रहित)	1.72
क्लोरीन	1.29	हाइड्रोजन	0.84
डाइनाइट्रोजन मोनोक्साइड	1.38	हीलियम	1.89

सारणी 21. भिन्न दाबों पर गैसों की श्यानता

(η, μ Pa·s)

गैस	तापक्रम, t, °C	दाब, MPa			
		5.07	10.1	30.4	81.0
एथीलीन	40	13.4	28.8	—	—
कार्बन-डायक्साइड	40	18.1	48.8	—	—
नाइट्रोजन	25	18.1	19.9	26.8	45.8
	75	20.5	21.5	26.6	41.6
हवा	0	18.2	19.2	28.6	—
	25	19.2	20.6	28.0	—
	100	22.4	23.4	28.1	—

सारणी 22. भिन्न तापक्रमों पर पानी की श्यानता

t, °C	0	5	10	15	20	25	30	40	50	60
η, μPa·s	1797	1518	1307	1140	1004	895	803	655	551	470
t, °C	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160
η, μPa·s	407	357	317	284	256	232	212	196	184	174

सारणी 23. भिन्न तापक्रमों पर द्रवों की श्यानता

(η, 10^{-2} Pa·s)

द्रव	t, °C					
	10	20	30	50	70	100
एनीलीन	0.653	0·439	0.318	0.191	0.129	0.076
एसीटोन	0.0358	0.0324	0.0295	0.0251	—	—
तेल, अंडी का	244	98.7	45.5	12.9	4.9	—
—, ट्रांसफार्मर के लिये	4.2	1.98	1.34	0.64	0.38	0.213
बेंजीन	0.076	0.065	0.056	0.0436	0.035	—

सारणी 24. **द्रव-अवस्था में धातुओं की श्यानता**

द्रव्य	t, °C	η, mPa·s	द्रव्य	t, °C	η, mPa·s
अलुमीनियम	700	2.90	पोटैशियम	100	0.46
	800	1.40		200	0.34
टिन	240	1.91		500	0.185
	400	1.38		700	0.14
	600	1.05	बिस्मथ	304	1.65
पारा	20	1.54		451	1.28
	50	1.40		600	0.99
	100	1.24	सीसा	441	2.11
	200	1.03		551	1.69
	300	0.90		844	1.18
	400	0.83	सोडियम	103.7	0.69
	500	0.77		400	0.25
	600	0.74		700	0.18

ताप और आण्विक भौतिकी

मूल अवधारणाएं और नियम

1. ताप-प्रवैगिकी के मूल नियम . तापग्राहिता

कणिकाओं की विशाल संख्या से बना हुआ पिंड (वस्तु) **स्थूल व्यूह** कहलाता है । स्थूल व्यूह के आकार अणुओं व परमाणुओं के आकार से काफी बड़े होते हैं । स्थूल व्यूह और परिवेशी पिंडों के साथ इसकी व्यतिक्रियाएं **स्थूलदर्शी परामितक** नामक भौतिक राशियों द्वारा लंछित होती है । ऐसे परामितकों के उदाहरण हैं : आयतन, घनत्व, दाब, चुंबकीकरण, आदि ।

यदि समय के साथ-साथ व्यूह के परामितक बदलते नहीं है और साथ ही किसी बाह्य कारण के प्रभाव से व्यूह में द्रव, ताप आदि का प्रवाह नहीं हो रहा है, तो ऐसी अवस्था को **संतुलित अवस्था (तापप्रवैगिक संतुलन)** कहते हैं ।

तापप्रवैगिक संतुलन में स्थित स्थूल व्यूह तापप्रवैगिक व्यूह कहलाता है; तापप्रवैगिक व्यूह की अवस्था को लंछित करने वाली राशियां **तापप्रवैगिक परामितक** कहलाती हैं ।

यदि व्यूह का किसी अन्य व्यूह के साथ द्रव्य या ताप का विनिमय नहीं हो रहा है, तो वह **असंपृक्त व्यूह** कहलाता है। असंपृक्त व्यूह कालांतर में तापप्रवेगिक संतुलन की अवस्था प्राप्त कर लेता है और इस अवस्था से खुद-ब-खुद नहीं निकल पाता (**तापप्रवेगिकी का मूल परिग्रह**)। मूल परिग्रह व्यूह की सिर्फ महत्तम संभाव्य अवस्था को निर्धारित करता है, क्योंकि कणिकाओं की अविराम गति संतुलन की अवस्था से विचलन उत्पन्न करती रहती है।

संतुलित व्यूह की आंतरिक गति को लंछित करने वाली अदिष्ट राशि का नाम **तापक्रम** है। तापक्रम की गणना व्यूह के तीक्ष्ण (अर्थात् द्रव्यमान पर नहीं निर्भर करने वाले) परामितकों में होती है; वह अणुओं या परमाणुओं की तापीय गति की औसत गतिज ऊर्जा की माप है (दे. पृ. 76)। असंतुलित व्यूह के लिये तापक्रम की अवधारणा कोई अर्थ नहीं रखती। संतुलित व्यूह के लिये तापक्रम के अस्तित्व के बारे में यह उक्ति **तापप्रवेगिकी का दूसरा परिग्रह** है।

पिंड के तापक्रम में परिवर्तन के कारण पिंड के विभिन्न गुणों में परिवर्तन हो जा सकते हैं (उसके आकार व घनत्व में, उसकी प्रत्यास्थता, विद्युचालकता आदि में)। **तापप्रवेगिक पैमाने** द्वारा निर्धारित तापक्रम **तापप्रवेगिक तापक्रम** कहलाता है।

तापप्रवेगिक तापक्रम की इकाई **केल्विन** (K) है। केल्विन पानी के *त्रिगुण बिंदु के तापप्रवेगिक तापक्रम का 1/273.16 अंश* है। तापप्रवेगिक तापक्रमों के पैमाने पर निचला बिंदु **परम शून्य** होता है।* व्यवहार में सेल्सियस के पैमाने का प्रयोग भी स्वीकृत है। इसमें तापक्रम t व्यंजन $t=T-T_0$ द्वारा निर्धारित होता है, जिसमें $T_0=273.15$ K है (परिभाषा से)। माप में सेल्सियस-डिग्री और केल्विन-डिग्री परस्पर बराबर होते हैं।

---

* तापप्रवेगिक तापक्रम को परम तापक्रम भी कहते हैं। केल्विन द्वारा प्रस्तावित इसका पैमाना $t=-273.15°C$ से शुरू होता है (यह परम तापक्रम का शून्य है)।

त्रिगुण-बिंदु ऐसे दाब व तापक्रम का कटान-बिंदु है, जिस पर पदार्थ एक साथ ठोस, द्रव व गैस तीनों अवस्थाओं में संतुलित रहता है। पानी का त्रिगुण-बिंदु दाब $p=609.7$ Pa व तापक्रम $t=0.00745°C$ पर प्राप्त होता है।

परम तापक्रम के पैमाने पर शून्य और पानी के त्रिगुण बिंदु के तापक्रम के बीच के अंतराल का 1/273.16 अंश केल्विन के नाम से पुकारा गया है।—अनु.

केल्विन में व्यक्त तापप्रवेगिक तापक्रम प्रतीक T द्वारा द्योतित होता है; सेल्सियस में व्यक्त तापक्रम t द्वारा द्योतित होता है।

व्यावहारिक उद्देश्यों के लिये तापक्रम के तापप्रवेगिक पैमाने के आधार पर 1968 में एक **अंतर्राष्ट्रीय व्यावहारिक तापक्रमी पैमाना** (International Practical Temperature Scale of 1968, IPTS-68) निर्धारित किया गया। इसमें 11 तापक्रम-बिन्दु निश्चित किये गये थे; इन बिंदुओं के तापक्रम सारणी 25 में दिये गये हैं। यदि यह दिखाना आवश्यक है कि तापक्रम IPTS-68 द्वारा निर्धारित किया गया है, तो तापक्रम द्योतित करने वाले संकेत को संख्या 68 से चिह्नित कर देते हैं (जैसे, T_{68} या t_{68})।

पिंड (व्यूह) की आंतरिक ऊर्जा अणुओं की बेतरतीब गति की गतिज ऊर्जा, उनकी व्यतिक्रिया (पारस्परिक क्रिया) की स्थितिज ऊर्जा और अंतराण्विक ऊर्जा का योगफल कहलाती है।

एक पिंड से दूसरे पिंड में ऊर्जा का आदान दो विधियों से संभव है। पहली विधि : यांत्रिक व्यतिक्रिया द्वारा, जिसमें कार्य यांत्रिक या विद्युचुंबकीय (दे. अध्याय 4) बलों द्वारा संपन्न होता है। दूसरी विधि तापीय व्यतिक्रिया की है, जिसमें ऊर्जा का आदान अणुओं की बेतरतीब गति द्वारा तापचालन (दे. पृ. 67) या तापीय विकिरण (दे. पृ. 151) के कारण होता है। पिंडों की तापीय व्यतिक्रिया में प्रदान की गयी ऊर्जा की मात्रा **ताप की मात्रा** (या सिर्फ **ताप**) कहलाती है; ताप को जूल में व्यक्त करते हैं।

द्रव्यमान m वाले किसी पिंड का तापक्रम t_0 से $t=t_0+\Delta t$ तक बढ़ाने के लिये पिंड को ताप की ΔQ मात्रा प्रदान करनी पड़ती है। राशि $\Delta Q/m\Delta t$ को तापक्रम-अंतराल $(t-t_0)$ में औसत विशिष्ट तापग्राहिता कहते हैं। इस अनुपात की सीमा

$$c_{\text{य}\text{a}}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta Q}{m\Delta t}=\frac{dQ}{mdt} \qquad (2.1)$$

परिभाषानुसार t_0 तापक्रम पर **यथार्थ विशिष्ट तापग्राहिता** (या सिर्फ **विशिष्ट तापग्राहिता**) है। विशिष्ट तापग्राहिता तापक्रम पर निर्भर करती है। पर अधिकांशतः हम इस निर्भरता की उपेक्षा करते हैं और यह मान लेते हैं कि विशिष्ट तापग्राहिता इकाई द्रव्यमान वाले पिंड का तापक्रम $t°C$ से $(t+1)°C$ बढ़ाने के लिये आवश्यक ताप-मात्रा के बराबर होती है (t का मान चाहे जो हो)।

m द्रव्यमान वाले पिंड के तापक्रम में Δt की वृद्धि के लिये आवश्यक ताप-मात्रा

$$\Delta Q = cm\Delta t \qquad (2.2)$$

होती है, जहां c = विशिष्ट तापग्राहिता है।

द्रव्यों की तापग्राहिता उन्हें गर्म करने की परिस्थितियों पर भी निर्भर करती है। समदाबीय प्रक्रिया (स्थिर दाब पर गर्म करने की स्थिति) में तापग्राहिता को **स्थिर दाब पर तापग्राहिता** (c_p) कहते हैं। समायतनी प्रक्रिया (स्थिर आयतन पर गर्म करने की क्रिया) में तापग्राहिता को **स्थिर आयतन पर तापग्राहिता** (c_V) कहते हैं। हमेशा $c_p > c_V$; ठोस अवस्था में द्रव्यों के लिये तापग्राहिताएं c_p व c_V नगण्य रूप से भिन्न होती हैं।

विशिष्ट तापग्राहिता की इकाई है जूल प्रति किलोग्राम-केल्विन (J/kg·K)।

गर्म करने पर व्यूह को प्राप्त ताप-मात्रा ΔQ और इस क्रिया में बाह्य बलों द्वारा व्यूह पर संपन्न कार्य ΔA का योगफल व्यूह की आंतरिक ऊर्जा में परिवर्तन ΔU के बराबर होता है **(तापप्रवैगिकी का प्रथम नियम)** :

$$\Delta Q + \Delta A = \Delta U. \qquad (2.3)$$

आंतरिक ऊर्जा में परिवर्तन ΔU आरंभिक व अंतिम अवस्थाओं पर निर्भर करता है और गर्म करने की प्रक्रिया पर नहीं निर्भर करता है।

ठंडे पिंड से गर्म पिंड की ओर ताप का गमन व्यूह में किसी परिवर्तन के बिना संभव नहीं है **(ताप प्रवैगिकी का दूसरा नियम)**।

परम शून्य तापक्रम की ओर जाने पर पिंड की तापग्राहिता शून्य की ओर प्रवृत्त होने लगती है **(तापप्रवैगिकी का तीसरा नियम)**।

2. प्रावस्था-संक्रमण

किसी व्यूह के उन सभी भागों को मिला-जुला कर एक **प्रावस्था** कहते हैं, जिनके भौतिक **गुण समान** होते हैं और जो विभाजक तलों द्वारा घिरे होते हैं। उदाहरण : मिल-जुल कर एक व्यूह बनाने वाले बर्फ, पानी व जल-वाष्प तीन भिन्न प्रावस्थाएं हैं; ग्रैफाइट और हीरा ठोस पदार्थ की दो भिन्न प्रावस्थाएं हैं।

पदार्थ द्वारा एक प्रावस्था से दूसरी में संक्रमण **प्रावस्था-संक्रमण** कहलाता है।

पदार्थ का क्रिस्टलिक ठोस अवस्था से द्रव में प्रावस्था-संक्रमण **गलना**

या पिघलना **(द्रवण)** कहलाता है। विपरीत दिशा में संक्रमण—द्रव-अवस्था से ठोस में—**क्रिस्टलीकरण** कहलाता है। प्रावस्था-संक्रमण के साथ-साथ ताप की एक नियत मात्रा अवशोषित या उत्सर्जित होती है (स्थिर दाब व तापक्रम पर); ताप की यह मात्रा **प्रावस्था-संक्रमण का ताप** कहलाती है।

द्रवण में प्रावस्था संक्रमण का ताप (द्रवण का ताप)

$$Q_{dr} = \lambda m \qquad (2.4)$$

होता है, जहां m द्रवित पदार्थ का द्रव्यमान है और λ = **द्रवण का विशिष्ट ताप** = ठोस पदार्थ के इकाई द्रव्यमान को द्रवणांक पर द्रवावस्था में लाने के लिये आवश्यक ताप-मात्रा (द्रवण-क्रिया के दरम्यान तापक्रम में परिवर्तन नहीं होता; इस स्थिर तापक्रम को ही द्रवणांक कहते हैं)। क्रिस्टलीकरण में ताप का उत्सर्जन होता है। द्रवण का ताप क्रिस्टलीकरण के ताप के बराबर होता है)।*

जब कोई पदार्थ पिघलता है, तो उसके आयतन में वृद्धि होती है (पानी, गैलियम, एंटीमनी, लोहा और बिस्मथ इसके अपवाद हैं; इनका आयतन घट जाता है।

क्रिस्टलिक (ठोस) अवस्था से सीधे वाष्प में परिणत होने की प्रक्रिया को **ऊर्ध्वपातन** कहते हैं।

वाष्पावस्था से द्रव या क्रिस्टल में प्रावस्था-संक्रमण **संघनन** कहलाता है।

द्रव से वाष्प में प्रावस्था-संक्रमण **वाष्पीकरण** कहलाता है और इसकी उल्टी प्रक्रिया—वाष्प से द्रव में प्रावस्था-संक्रमण—**द्रवीभवन (संघनन)** कहलाता है; वाष्पीकरण यदि द्रव या ठोस पिंड की सिर्फ मुक्त सतह से हो रहा है, तो इस क्रिया को **वाष्पन** कहते हैं; यदि वाष्पीकरण द्रव की मुक्त सतह पर ही नहीं, द्रव के भीतर भी हो रहा है, तो इस क्रिया को **उबलना (क्वथन)** कहते हैं। क्वथन स्थिर तापक्रम पर होता है (स्थिर बाह्य दाब की परिस्थिति में)। इस तापक्रम को **क्वथनांक** कहते हैं। दाब में परिवर्तन

---

* द्रवण के ताप व तापक्रम के बारे में जो कुछ भी कहा गया है, वह क्रिस्टलिक व अर्धक्रिस्टलिक पिंडों के लिये सत्य है। **क्रिस्टलिक** ऐसे पिंड को कहते हैं, जिसके गुण भिन्न दिशाओं में भिन्न होते हैं। बेतरतीबी से निदिष्ट अनेक सूक्ष्म क्रिस्टलों से बना हुआ पिंड **अर्धक्रिस्टलिक** कहलाता है।

के कारण पानी के क्वथनांक में करीब $2.8 \cdot 10^{-4}$ K/Pa का परिवर्तन होता है।

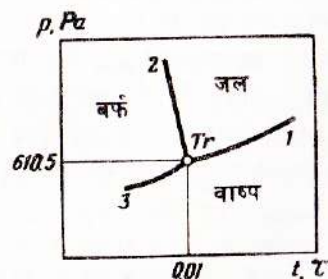
वाष्पीकरण में प्रावस्था-संक्रमण के लिये आवश्यक ताप (वाष्पीकरण का ताप)

$$Q_V = rm \qquad (2.5)$$

है, जहां m = वाष्प में परिणत होने वाले पदार्थ का द्रव्यमान, r = **वाष्पीकरण का विशिष्ट ताप** = इकाई द्रव्यमान द्रव के वाष्प में परिणत होने के लिये आवश्यक ताप (स्थिर दाब व तापक्रम पर)।

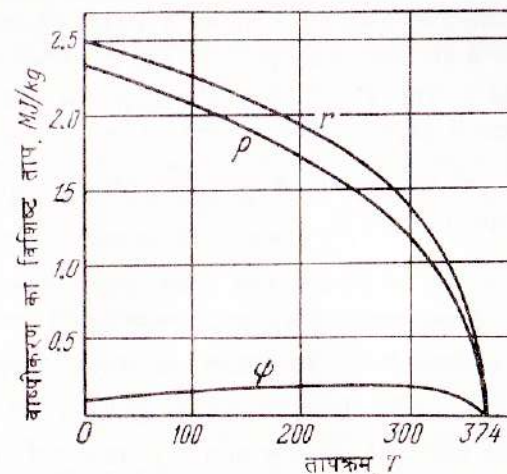
खुले बरतन में द्रव का वाष्पन तब तक जारी रह सकता है, जब तक कि सारा द्रव नहीं गायब हो जाता। बंद बरतन में द्रव का वाष्पन तब तक जारी रहता है, जब तक कि द्रव अवस्था में स्थित पदार्थ के द्रव्यमान और वाष्प के द्रव्यमान के बीच संतुलन नहीं स्थापित हो जाता। इस संतुलन में वाष्पन व संघनन की प्रक्रियाएं अवलोकित होती हैं, जो द्रव व गैस की क्षति-पूर्ति करती रहती हैं। ऐसे संतुलन को **प्रवेगिक संतुलन** कहते हैं। अपने द्रव के साथ प्रवेगिक संतुलन में स्थित वाष्प को **संतृप्त** का विशेषण देते हैं।

क्वथन उस तापक्रम पर होता है, जब द्रव के संतृप्त वाष्प का दाब बाह्य दाब के बराबर होता है।

तापक्रम बढ़ने साथ संतृप्त वाष्प का दाब व घनत्व बढ़ता है, पर द्रव का घनत्व घटता है। तापक्रम पर संतृप्त वाष्प के दाब की निर्भरता को व्यक्त करने वाला वक्र **वाष्पन-वक्र** या **संतृप्ति-रेखा** कहलाता है। ठोस क्रिस्टलिक पिंडों के लिये ऐसे वक्र **ऊर्ध्वपातन-वक्र** कहलाते हैं।

चित्र 18. पानी के त्रिगुण-बिंदु (Tr) के पास वाष्पन (1), द्रवण (2), और ऊर्ध्वपातन के वक्र

द्रवण-वक्र ठोस व द्रव प्रावस्थाओं के संतुलन की परिस्थितियों को निर्धारित करता है, वाष्पन-वक्र—द्रव व गैसीय प्रावस्थाओं के, ऊर्ध्वपातन-वक्र—ठोस व गैसीय प्रावस्थाओं के। तीनों वक्रों के कटान-बिंदु को **त्रिगुण बिंदु** कहते हैं (चित्र 18)। त्रिगुण बिंदु एक साथ तीनों प्रावस्थाओं के संतुलन की परिस्थितियां (दाब, तापक्रम और घनत्व) निर्धारित करता है।

द्रव व संतृप्त वाष्प के संतुलन का वक्र उस तापक्रम तक जारी रहता है, जिस पर उनके घनत्व बराबर हो जाते हैं; इस स्थिति में दोनों (द्रव व उसके वाष्प) के बीच की सीमा गायब हो जाती है। इसे **चरम अवस्था** कहते हैं और इस अवस्था के अनुरूप वाले घनत्व, दाब व तापक्रम को **चरम परामितक** कहते हैं (दे. पृ. 73)।

वाष्पीकरण का विशिष्ट ताप तापक्रम पर निर्भर करता है। तापक्रम बढ़ने पर वाष्पीकरण का विशिष्ट ताप घटता है। चरम तापक्रम पर वह शून्य के बराबर होता है। वाष्पीकरण का ताप r का एक भाग (वाष्पीकरण का आंतरिक ताप ρ) द्रव की ऊपरी परत पार करने में अणुओं द्वारा संपन्न कार्य में व्यय होता है और दूसरा भाग (वाष्पीकरण का बाह्य ताप Ψ) गैसीय प्रावस्था में संक्रमण के कारण पदार्थ का आयतन बढ़ने में संपन्न कार्य में व्यय

चित्र 19. पानी के लिये तापक्रम पर वाष्पन के बाह्य (Ψ), आंतरिक (ρ) और पूर्ण (r) ताप की निर्भरता

होता है। चित्र 19 में पानी के लिये तापक्रम t पर r, ρ, Ψ की निर्भरताएं दिखायी गयी है।

3. ठोस व द्रव पिंडों में तापीय प्रसार

ठोस व द्रव पिंडों का तापक्रम बदलने पर उनके आकार (माप) और आयतन में परिवर्तन होता है। $t^\circ C$ तापक्रम पर ठोस पिंड की लंबाई l_t को $0^\circ C$ तापक्रम पर उसकी लंबाई l_0, तापक्रम t और रैखिक प्रसार-गुणक α द्वारा निर्धारित करते है :

$$l_t = l_0\ (1 + \alpha t). \qquad (2.6)$$

रैखिक प्रसार-गुणक ऐसी राशि को कहते है, जो पिंड के तापक्रम में 1 डिग्री परिवर्तन के कारण उसकी लंबाई में होने वाली औसत ($0^\circ C$ से $t^\circ C$ के तापक्रम-अंतराल में) सापेक्षिक वृद्धि के बराबर होती है :

$$\alpha = (l_t - l_0)/(l_0 t)$$

(2.6) की तरह ही, तापक्रम t पर पिंड का आयतन

$$V_t = V_0\ (1 + \beta t), \qquad (2.7)$$

जहां β = आयतन के प्रसार का गुणक, $V_0 = 0^\circ C$ पर आयतन।

आयतन-प्रसार का गुणक पिंड के तापक्रम में 1 डिग्री परिवर्तन के कारण उसके आयतन में होने वाली औसत ($0^\circ C$ से $t^\circ C$ के तापक्रम-अंतराल में) सापेक्षिक वृद्धि के बराबर होता है : $\beta = (V_t - V_0)/(V_0 t)$। ठोस समदिक पिंड (हर दिशा में समान गुण रखने वाले पिंड) के लिये $\beta = 3\alpha$.

आयतनी व रैखिक प्रसारों के गुणक ऋण एक घात वाले केल्विन (K^{-1}) में व्यक्त किये जाते हैं।

अधिक सही सूत्र हैं :

$$\Delta l = l_0(at + bt^2),\ l_t = l_0(1 + at + bt^2),$$

जहां a व b हर पदार्थ के लिये प्रायोगिक तौर पर निर्धारित गुणक हैं।

जिस तापक्रम-अंतराल में पिंड गर्म किया जा रहा है, उसे बदलने पर पिंड का रैखिक प्रसार-गुणक भी बदल जाता है। उदाहरणार्थ, लोहे के लिये $l_t = l_0(1 + 117 \cdot 10^{-7} t + 4.7 \cdot 10^{-9} t^2)$ होता है; लोहे को $0^\circ C$ से $75^\circ C$ के अंतराल में गर्म करने पर उसका रैखिक प्रसार-गुणक

$1.21 \cdot 10^{-5}\ K^{-1}$ होता है और $0^\circ C$ से $750^\circ C$ के अंतराल में $1.52 \cdot 10^{-5}\ K^{-1}$ होता है।

पिंड को गर्म करने पर उसके घनत्व में परिवर्तन होता है। तापक्रम t पर घनत्व

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \beta t} \qquad (2.8)$$

होगा, जहां $\rho_0 = 0^\circ C$ पर पिंड का घनत्व, β = आयतनी प्रसार-गुणक।

4. तापचालन, विसरण, श्यानता

ताप का स्थानांतरण चालन, विसरण व विकिरण द्वारा होता है (दे. तापीय विकिरण)।

तरल (द्रव व गैस) में तापक्रम-वैषम्यता मुख्यतः संवहन द्वारा दूर होती है। **संवहन** से तात्पर्य है कि गर्म भागों से अपेक्षाकृत ठंडे भागों की ओर तरल की धाराएं निर्दिष्ट हो जाती हैं (इन्हें **संवहन-धाराएं** कहते है—अनु.)। ठोस में संवहन नहीं होता।

ताप-चालन. अणुओं या परमाणुओं की बेतरतीब तापीय गति के कारण होने वाले ताप के स्थानांतरण को ताप-चालन कहते हैं।

क्षेत्र S वाली सतह से समय t में गुजरने वाले ताप की मात्रा

$$Q = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta l} St \qquad (2.9)$$

होती है, जहां λ = तापचालकता-गुणांक है, ΔT = दो बिंदुओं के तापक्रम में अंतर; इन बिंदुओं की आपसी दूरी अधिकतम तापक्रम-परिवर्तन की दिशा में Δl है। $\Delta T/\Delta l$ को **तापक्रम का नतन** कहते हैं।

तापचालकता-गुणांक इकाई समय में इकाई क्षेत्र से गुजरने वाली ताप-मात्रा को कहते हैं (जब तापक्रम-नतन एक के बराबर होता है)।

तापचालकता-गुणांक की इकाई वाट प्रति मीटर-केल्विन (W/m·K) है। 1 W/m·K ऐसे माध्यम की तापचालकता का गुणांक है, जिसमें (तापक्रम-नतन 1 K/m होने पर) ताप की 1J मात्रा $1 m^2$ क्षेत्र से 1s में गुजरता है (सतह ताप-स्थानांतरण के अभिलंब है)।

विसरण. विसरण घनत्व-वैषम्यता दूर होने की क्रिया है, जो आण्विक

गति के कारण द्रव्य के स्थानांतरण द्वारा संपन्न होती है। t समय में क्षेत्र S से गुजरने वाले द्रव्य का द्रव्यमान

$$M = D\frac{\Delta\rho}{\Delta l}St \qquad (2.10)$$

है, जहां $\Delta\rho$ = दो बिंदुओं के बीच घनत्व में अंतर; इन बिंदुओं की आपसी दूरी अधिकतम घनत्व-परिवर्तन की दिशा में Δl है। $\Delta\rho/\Delta l$ को घनत्व का नतन कहते हैं। D = विसरण-गुणांक है।

विसरण-गुणांक इकाई समय में इकाई क्षेत्र से गुजरने वाले द्रव्य के द्रव्यमान को कहते हैं (जब घनत्व का नतन 1 के बराबर होता है)।

विसरण-गुणांक की इकाई वर्गमीटर प्रति सेकेंड (m^2/s) है। 1 m^2/s ऐसे माध्यम का विसरण-गुणांक है, जिसमें (घनत्व-नतन 1 kg/m^4 होने पर) द्रव्य का 1kg द्रव्यमान 1m² क्षेत्र से 1s में गुजरता है (सतह द्रव्य-स्थानांतरण के अभिलंब है)।

आंतरिक घर्षण (श्यानता) द्रव या गैस की परतों के सापेक्षिक स्थानांतरण में घर्षण-बल उत्पन्न होते हैं, जो परतों की गति मंद करते हैं, यदि उनका वेग अधिक होता है, और परतों की गति त्वरित करते हैं, यदि उनका वेग कम होता है। श्यानता का कारण एक परत से दूसरे में संक्रमण करने वाले अणुओं द्वारा सुव्यवस्थित गति के आवेग का स्थानांतरण है।

आंतरिक घर्षण का बल है

$$F_{ag} = \eta\frac{\Delta v}{\Delta l}S, \qquad (2.11)$$

जहां Δv = गतिमान परतों के वेगों का अंतर, Δl = इन परतों के बीच की दूरी (वेग की लंब दिशा में); $\Delta v/\Delta l$ वेग-नतन कहलाता है; η — आंतरिक घर्षण का गुणांक है।

आंतरिक घर्षण का गुणांक (या श्यानता-गुणांक) इकाई क्षेत्र वाली परतों के बीच उत्पन्न होने वाला आंतरिक घर्षण-बल कहलाता है (जब वेग-नतन इकाई के बराबर होता है)।

श्यानता-गुणांक की इकाई **पास्कल-सेकेंड** ($Pa \cdot s$) है। 1 $Pa \cdot s$ ऐसे

माध्यम का श्यानता-गुणांक है, जिसमें पटलीय प्रवाह[1] की स्थिति में स्पर्शरेखी तनाव 1 Pa होता है, जब वेग की लंब दिशा में परस्पर 1 m दूर स्थित परतों के वेगों का अंतर 1 m/s होता है।

समीकरण (2.9)-(2.11) तभी लागू होते हैं, जब द्रव या गैस के अणु के मुक्त पथ की लंबाई (दे. पृ. 73) बरतन की माप से कम होती है।

5. द्रवों का तलीय तनाव

द्रव की सतह पर स्थित अणु पर बाकी अणुओं की ओर से बल लगते हैं, जिनकी दिशा द्रव में भीतर की ओर होती है।

अणुओं की सतहवर्ती (ऊपरी) परत लमड़ी हुई प्रत्यास्थ झिल्ली की याद दिलाती है, जो अपनी सतह को छोटी करने की प्रवृत्ति रखती है। सतहवर्ती परत के हर भाग पर उसके चारों ओर के अन्य भाग एक बल लगाते हैं, जो विचाराधीन भाग को लमड़ी हुई अवस्था में रखता है। इस प्रकार के बल सतहवर्ती (या सतही) परत के अनुतीर लागू रहते हैं और तलीय तनाव के बल कहलाते हैं।

तलीय तनाव का बल सूत्र

$$F = \alpha l \qquad (2.12)$$

द्वारा निर्धारित होता है, जहां l = द्रव की सतही परत की परिमिति, α = तलीय तनाव का गुणांक है।

तलीय तनाव का गुणांक (या सिर्फ **तलीय तनाव**) ऐसी राशि को कहते हैं, जो द्रव की सतही परत की ऋजु (सीधी) किनारी की इकाई लंबाई पर क्रियाशील बल के सांख्यिक मान के बराबर होती है।

तलीय तनाव की इकाई न्यूटन प्रति मीटर (N/m) है।

तलीय तनाव तापक्रम बढ़ने पर घटता है और परम तापक्रम पर शून्य हो जाता है।

---

1. द्रव के सुव्यवस्थित प्रवाह को **पटलीय** कहते हैं, जब उसके हर बिंदु का वेग नियत होता है, उसका पथ मुख्य धारा के समानांतर होता है। इसके विपरीत, **क्षुब्ध** प्रवाह में हर बिंदु का वेग मान व दिशा में निरंतर बदलता रहता है। यदि नली में द्रव-प्रवाह का वेग एक निश्चित मान को पार करता है, तो प्रवाह पटलीय से क्षुब्ध में परिणत हो जाता है।
—अनु.

6. गैसीय नियम

गैसीय अवस्था में स्थित अधिकतर पदार्थों के गुण साधारण परिस्थितियों में निम्न समीकरण द्वारा निरूपित हो सकते हैं :

$$pV = \frac{m}{\mu} RT. \qquad (2.13)$$

इसे **आदर्श गैस की अवस्था का समीकरण** या **क्लैपिरोन-मेंदेलीव का समीकरण** कहते हैं। यहां p = गैस का दाब, V = द्रव्यमान m वाली गैस का आयतन, μ = मोलीय द्रव्यमान = अनुपात m/ν (ν द्रव्य की मात्रा है), R = व्यापक (या मोलीय) गैस-स्थिरांक, T = परम तापक्रम।

द्रव्य की मात्रा की इकाई मोल है। **मोल (mol)** *द्रव्य की उस मात्रा को कहते हैं, जिसमें उतने कण होते हैं, जितने समस्थ कार्बन-12 के 0.012 kg में परमाणु होते हैं।* कण अणु, परमाणु, आयन, एलेक्ट्रोन या कोई अन्य कणिका या कणिका-समूह हो सकते हैं।

मोलीय द्रव्यमान का सन्निकट मूल्य सापेक्षिक आण्विक द्रव्यमान (M_r) द्वारा निर्धारित किया जा सकता है, जो विचाराधीन द्रव्य के अणु के द्रव्यमान m_m और समस्थ कार्बन-12 के परमाणु-द्रव्यमान m_c के 1/12 अंश के अनुपात के बराबर होता है : $M_r = m_m/[(1/12)m_c]$। उदाहरण के लिये, आक्सीजन (O_2) का सापेक्षिक आण्विक द्रव्यमान 32 है और कार्बन डायक्साइड (CO_2) का 44, अतः इनके तदनुरूप **मोलीय** द्रव्यमान क्रमशः 0.032 kg/mol और 0.044 kg/mol होंगे।

किसी भी द्रव्य के एक मोल में कणिकाओं की संख्या हमेशा समान होती है; इस संख्या को **एवोगाड्रो की संख्या** (N_A) कहते हैं : $N_A = 6.022 \cdot 10^{23}$ mol^{-1} है।

क्लैपिरोन-मेंदेलीव के समीकरण को (प्रथम सन्निकटन में) किसी भी द्रव्य पर लागू किया जा सकता है, यदि वह गैस की अवस्था में है और उसका घनत्व विचाराधीन तापक्रम पर उसके संतृप्त वाष्प के घनत्व से कम है।

समीकरण (2.13) से **गे-लुसाक, चार्ल्स और ब्वायल-मेरियट के नियम** प्राप्त होते हैं। स्थिर p और m के लिये (चूंकि R = const और μ दिये हुए द्रव्य के लिये स्थिर है) :

$$V_1 = V_0 \frac{T_1}{T_0} \qquad (2.14)$$

जहां V_0 तापक्रम $T_0 (= 273.15°K = 0°C)$ पर गैस का आयतन है। इससे गे-लुसाक का नियम (**समदाबी प्रक्रिया** का समीकरण) निकलता है :

$$V_t = V_0 \left(1 + \frac{1}{273} t\right), \qquad (2.15)$$

जहां t—सेल्सियस में तापक्रम है।

स्थिर V व m पर चार्ल्स का नियम (**समायतनी प्रक्रिया** का समीकरण) प्राप्त होता है :

$$p = p_0\left(1 + \frac{1}{273} t\right). \qquad (2.16)$$

स्थिर T व m पर ब्वायल-मेरियट का नियम (**समतापक्रमी प्रक्रिया** का समीकरण) प्राप्त होता है :

$$p_1V_1 = p_2V_2 \qquad (2.17)$$

राशि $\alpha = 1/273.15$ K^{-1} को आदर्श गैस के **आयतन-प्रसार का गुणक** या **दाब का तापक्रमी गुणांक** कहते हैं। वातदाब के निकटवर्ती या इससे अधिक दाब पर यथार्थ गैसों के लिये तदनुरूप गुणक इस राशि से कुछ भिन्न होते हैं।

यदि गैस के दाब p, तापक्रम T और मोलीय द्रव्यमान μ ज्ञात हों तो गैस का घनत्व ρ सूत्र (2.13) द्वारा कलित किया जा सकता है :

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\mu p}{RT}. \qquad (2.18)$$

समतापक्रमी प्रसारण में गैस बाह्य दाब के बल के विरुद्ध कार्य संपन्न करती है; यह कार्य मुख्यतया परिवेश से प्राप्त ताप के व्यय द्वारा संपन्न होता है; गैस और परिवेश का तापक्रम परिवर्तित नहीं होता। गैस के समतापक्रमी संकुचन में ताप बाह्य परिवेश को प्राप्त होता है।

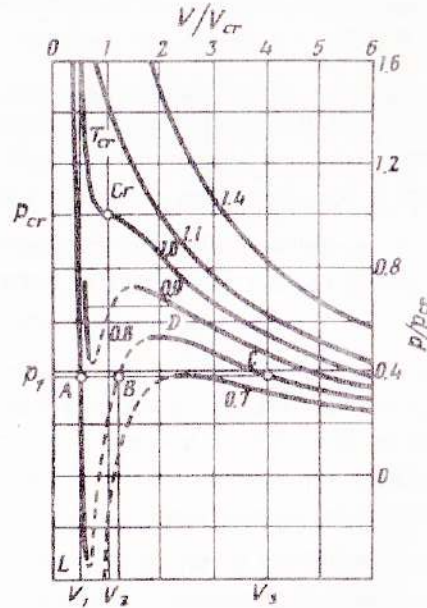
परिवेश के साथ ताप-विनिमय के बिना ही गैस के आयतन में परिवर्तन (तापरुध प्रक्रिया) होने पर स्थिर द्रव्यमान वाली गैस के दाब और आयतन तापरुधता-समीकरण द्वारा संबद्ध होते हैं :

$$pV^{\gamma} = \text{const}, \qquad (2.19)$$

जहां $\gamma = c_p / c_V$ = बहुपर्ययी घात।

यदि गैस का घनत्व दिये हुए तापक्रम पर संतृप्त वाष्प के घनत्व के साथ तुलनीय होता है, तो आदर्श गैस की अवस्था के समीकरण से काफी अधिक विचलन अवलोकित होता है। इस स्थिति में गैस के अणुओं की व्यतिक्रिया के बल और अणुओं द्वारा छेंके गये आयतन को भी ध्यान में रखना पड़ता है। इसमें आदर्श गैस का समीकरण प्राप्त होता है। अधिकतम प्रयुक्त समीकरण **वान डेर वाल्स** का है :

$$\left[p+\left(\frac{m}{\mu}\right)^2 \frac{a}{V^2} \right]\left(V-\frac{m}{\mu}b \right)=\frac{m}{\mu}RT, \qquad (2.20)$$

जहाँ V=m द्रव्यमान वाली गैस का आयतन, μ=मोलीय द्रव्यमान, a व b वान डेर वाल्स के स्थिरांक हैं, जो एक मोल गैस के लिये चरम परामितकों—चरम आयतन V_{ch}, चरम दाब p_{ch} और चरम तापक्रम T_{ch} द्वारा निर्धारित होते हैं :

चित्र 20. वान डेर वाल्स के समताप-वक्र। दिशाक्षों पर आयतन व दाब के सापेक्षिक मान V/V_{ch} और p/p_{ch} लिये गये हैं, वक्रों के पास संख्याएं सापेक्षिक ताप T/T_{ch} दिखाती हैं।

$$a=3p_{ch}V^2_{ch}, \quad b=\frac{1}{3}V_{ch}, \quad R=\frac{8}{3}\frac{V_{ch}\,p_{ch}}{T_{ch}}. \qquad (2.21)$$

असलियत में स्थिरांक a व b तापक्रम पर निर्भर करते हैं।

वान डेर वाल्स के समतापक्रमी वक्र चित्र 20 में दिखाये गये हैं। T_{ch} से कम तापक्रमों पर समतापक्रमी वक्र S जैसा मुड़े होते हैं; इन तापक्रमों पर p के एक मान के अनुरूप आयतन के तीन मान होते हैं (जैसे दाब p_1 के अनुरूप है – आयतन V_1, V_2, V_3)। T_{ch} से ऊपर के तापक्रमों पर वक्र के रूप S जैसा मुड़े हुए नहीं होते। तापक्रम T_{ch} **चरम तापक्रम** है (और दे. पृ. 64); इसके अनुरूप दाब p_{ch} व आयतन V_{ch} के मान **चरम दाब** व **चरम आयतन** कहलाते हैं। T_{ch}, p_{ch}, V_{ch} के अनुरूप वाली अवस्था को द्रव्य की **चरम अवस्था** कहते हैं।

असलियत में S जैसे मोड़ वाले भाग पर वक्र क्षैतिज अक्ष के समानांतर चलता है (दाब p_1 के लिये समतापक्रमी वक्र बिंदु A, B, C से होकर गुजरता है)। ये भाग द्रव व गैस के बीच संतुलन के अनुरूप है। अपने द्रव के साथ संतुलन की अवस्था में स्थित गैस (या वाष्प) को संतृप्त वाष्प कहते हैं (दे. पृ. 65)। समतापक्रमी वक्र कुछ परिस्थितियों में भाग AL (अतितप्त द्रव्य की अवस्था) और CD (अतिसंतृप्त वाष्प) से हो कर गुजर सकता है, पर ये अवस्थाएं स्थायी नहीं होतीं।

दाब को बढ़ा कर गैस को द्रवीभूत करने के लिये उसे चरम तापक्रम से नीचे तक ठंडा करना पड़ता है। गैस के द्रवीभवन का तापक्रम उस दाब द्वारा निर्धारित होता है, जिसके अंतर्गत वह स्थित होता है। सारणी 35 में द्रवीभूत गैसों के क्वथनांक दिये गये हैं। दाब कम कर के (उदाहरणार्थ, उत्पन्न वाष्प को निष्कासित कर के) क्वथनांक को कम किया जा सकता है।

वान डेर वाल्स का समीकरण कुछ परिस्थितियों में द्रव्य की द्रवावस्था को भी निरूपित कर सकता है।

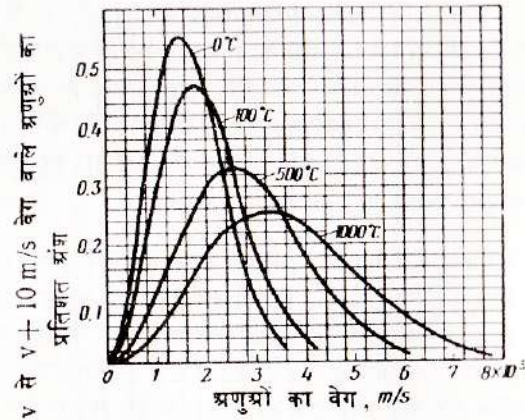
7. गैसों के गतिकीय सिद्धांत के मूल तत्त्व

आण्विक दृष्टिकोण से गैस स्वतंत्र रूप से गतिमान कणिकाओं (अणुओं या परमाणुओं) की बहुत बड़ी संख्या है। ये कणिकाएं भिन्न वेगों से गतिमान रहते हैं; एक दूसरे से टकराते हुए अपना वेग बदलते रहते हैं।

दो क्रमिक टक्करों के बीच अणु द्वारा तय किये गये पथ की औसत लंबाई **स्वतंत्र धावन का पथ** या **मुक्त पथ** कहलाती है। गैस में मुक्त पथ की लंबाई

$$l=\frac{kT}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 p} \qquad (2.22)$$

है, जहां $k=R/N_A$=बोल्ट्समान का स्थिरांक, σ=अणु का व्यास, T=परम तापक्रम (K), N_A=एवोगाड्रो की संख्या, p=दाब, R=व्यापक गैसीय स्थिरांक।

वेगों के अनुसार अणुओं के वितरण को निरूपित करने वाला नियम **वितरण का फलन** कहलाता है। आदर्श गैस के अणुओं का वितरण-फलन (मैक्सवेल का वितरण-फलन) चित्र 21 में प्रस्तुत किया गया है। ऊर्ध्वाक्ष पर अणुओं की सापेक्षिक संख्या $\Delta n/n$ दिखायी गयी है, जिनका वेग v से $v+\Delta v$ की सीमा में है; क्षैतिज अक्ष पर वेग लिये गये हैं।

चित्र 21. भिन्न तापक्रमों के लिये वेगों के अनुसार हाइड्रोजन अणुओं का वितरण।

चित्र 21 में उच्चिष्ठ के अनुरूप वाला वेग अणु का **महत्तम संभाव्य वेग** v_s कहलाता है।

अणुओं का औसत वेग है

$$v_{au}=\frac{v_1+v_2+\ldots+v_n}{n}, \qquad (2.23)$$

जहां $v_1, v_2, \ldots v_n$ अणुओं के वेग हैं; वेगों के मान परम हैं।

अणुओं का **औसत वर्गीय वेग** है

$$v_w=\left(\frac{v_1^2+v_2^2+\ldots+v_n^2}{n}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (2.24)$$

वेगों के कलन के लिये मैक्सवेल के वितरण-फलन से निम्न व्यंजन प्राप्त होते हैं :

$$v^2_s=\frac{2kT}{m},\quad v^2_{au}=\frac{8kT}{\pi m},\quad v^2_w=\frac{3kT}{m} \qquad (2.25)$$

जहां m=एक अणु का द्रव्यमान है और $v_w>v_{au}>v_s$।

गैस के दाब का कारण बरतन की दीवार पर अलग-अलग अणुओं की चोट है; उसे कलित करने के लिये सूत्र है

$$p=\frac{1}{3}nmv^2_w=nkT, \qquad (2.26)$$

जहां n अणुओं की सांद्रता (इकाई आयतन में अणुओं की संख्या) है।

मिश्रण में उपस्थित **गैस का आंशिक दाब** ऐसे दाब को कहते हैं, जो विचाराधीन गैस उत्पन्न करती, यदि वह दिये हुए आयतन में (उसी तापक्रम पर) अकेली होती।

आदर्श गैसों के मिश्रण में, जो आपस में रासायनिक प्रतिक्रिया नहीं करते, कुल दाब मिश्रण में उपस्थित गैसों के आंशिक दाबों का योगफल होता है (**डाल्टन का नियम**) :

$$p=p_1+p_2+\ldots+p_n \qquad (2.27)$$

आदर्श गैस के एक अणु की **औसत गतिज ऊर्जा** सिर्फ तापक्रम पर निर्भर करती है :

$$E=\frac{1}{2}\,ikT, \qquad (2.28)$$

जहां $i=3$ एकपरमाणुक गैस के लिये,
$i=5$ द्विपरमाणुक गैस के लिये,
$i=6$ बहुपरमाणुक गैस के लिये।

एक मोल आदर्श गैस के अणुओं की गतिज ऊर्जा

$$E_\mu=\frac{1}{2}\,iRT \qquad (2.29)$$

स्वातंत्र्य वेग (दे. पृ. 12) से अधिक बड़े वेग से गतिमान अणु वातावरण की ऊपरी परतों से निकल कर वाह्य व्योम में चले जा सकते हैं।

किसी ग्रह के गुरुत्वाकर्षण-क्षेत्र के प्रभाव से उस ग्रह को आवृत रखने वाला गैसीय मिश्रण उस ग्रह का वातावरण कहलाता है। ग्रह की सतह से ऊँचाई h के बढ़ने पर वातावरण का दाब घटता है। यदि यह मान लिया जाये कि, वातावरण का तापक्रम ऊँचाई पर नहीं निर्भर करता, तो

$$p = p_0 e^{-\mu g h/(RT)} \quad (2.30)$$

जहां μ = वातावरण में उपस्थित गैसों के मिश्रण का औसत मोलीय द्रव्यमान, g = ग्रह की सतह के निकट स्वतंत्र अभिपातन का त्वरण, R = व्यापक गैसीय स्थिरांक, T = केल्विन के पैमाने पर तापक्रम, p_0 = ग्रह की सतह के समीप वातावरण का दाब, e = प्राकृतिक लघुगणकों का आधार ($e \approx 2.72$)। संबंध (2.30) **दाबमापी सूत्र** कहलाता है।

पार्थिव वातावरण के लिये दाबमापी सूत्र को निम्न रूप में लिखा जा सकता है :

$$h = 8000 \ln \frac{p_0}{p},$$

जहां h = मीटर में व्यक्त ऊँचाई।

सोवियत संघ और अनेक अन्य देशों में तुलना के लिये एक मानक वातावरण अपनाया है। इसके कलन के लिये यह माना गया है कि 15°C तापक्रम पर सागर-स्तर पर दाब 101325 Pa होता है और ऊँचाई के साथ-साथ तापक्रम-ह्रास 6.5 K प्रति 1000 m होता है। मानक वातावरण के परामितक सारणी 53 में दिये गये हैं।

हमारे परिवेश की हवा में जलवाष्प की कुछ मात्रा हमेशा उपस्थित रहती है। 1 m^3 हवा में उपस्थित जलवाष्प का द्रव्यमान **परम आर्द्रता** कहलाता है। परम आर्द्रता को जलवाष्प के आंशिक दाब द्वारा माप सकते हैं।

परम आर्द्रता के बढ़ने पर जलवाष्प संतृप्त वाष्प की अवस्था के निकट

होता जाता है। दिये हुए तापक्रम पर **महत्तम परम आर्द्रता*** 1 m^3 में उपस्थित संतृप्त जलवाष्प के द्रव्यमान को कहते हैं।

सापेक्षिक आर्द्रता परम आर्द्रता और महत्तम आर्द्रता के अनुपात को प्रतिशत अंशों में व्यक्त करने से प्राप्त होता है।

गैस की तापचालकता, श्यानता और विसरण के गुणांक (λ, η, D) निम्न सूत्रों द्वारा कलित होते हैं :

$$\lambda = \frac{1}{3} \rho v_{au} l c_V \quad (2.31)$$

$$\eta = \frac{1}{3} \rho v_{au} l \quad (2.32)$$

$$D = \frac{1}{3} v_{au} l \quad (2.33)$$

जहां ρ = गैस का घनत्व, v_{au} = गैस के अणुओं का औसत वेग, c_V = स्थिर आयतन पर विशिष्ट तापग्राहिता, l = अणुओं के स्वतंत्र धावन का पथ।

यदि स्वतंत्र धावन-पथ की लंबाई उस बरतन के आकार से बड़ी है, जिसमें गैस स्थित है, तो ऐसे विरलन को **रिक्तता (निर्वात)** कहते हैं। निर्वात में वेग-नतन, तापक्रम और, इसीलिये, आंतरिक घर्षण, तापचालकता आदि जैसी अवधारणाएं अपना अर्थ खो बैठती हैं। पर निर्वात में दो पत्तरों के बीच घर्षण-बल F_{nir} उत्पन्न हो जाता है, यदि वे परस्पर समानांतर, सापेक्षिक वेग Δv से गतिमान होते हैं। इसके अतिरिक्त, दोनों की सतहों के बीच ताप-विनिमय Q_{nir} भी होता है (सतहों के तापक्रमों का अंतर ΔT है)। इन परिस्थितियों में

$$F_{nir} = \eta_{nir} S \, \Delta v, \quad Q_{nir} = \lambda_{nir} S \, \Delta T t, \quad (2.34)$$

जहां घर्षण-गुणांक $\eta_{nir} = \frac{1}{6} \rho v_{au}$, तापचालकता $\lambda_{nir} = \frac{1}{6} \rho v_{au} c_V$, S = पत्तरों की सतह का क्षेत्रफल, t = समय।

*कुछ परिस्थितियों में वाष्प का अतिसंतृप्तन भी संभव है।

सारणी और ग्राफ

सारणी 25. **अंतर्राष्ट्रीय व्यावहारिक तापक्रमी पैमाना (IPTS-68)**

संतुलन की अवस्था	तापक्रम का तय किया गया मान	
	K	°C
संतुलित हाइड्रोजन का त्रिगुण बिंदु	13.81	—259.34
25 mm Hg दाब पर हाइड्रोजन की द्रव व गैस प्रावस्थाओं के बीच संतुलन	17.042	—256.108
हाइड्रोजन की द्रव व गैस प्रावस्थाओं के बीच संतुलन	20.28	—252.87
नियोन की द्रव व गैस प्रावस्थाओं के बीच संतुलन	27.102	—246.048
आक्सीजन का त्रिगुण बिंदु	54.361	—218.789
आक्सीजन की द्रव व गैस प्रावस्थाओं के बीच संतुलन	90.188	—182.962
पानी का त्रिगुण बिंदु	273.16	0.01
पानी की द्रव व वाष्प प्रावस्थाओं के बीच संतुलन	373.15	100
जस्ता की ठोस व द्रव प्रावस्थाओं के बीच संतुलन	692.73	419.58
चांदी की ठोस व द्रव प्रावस्थाओं के बीच संतुलन	1235.08	961.93
स्वर्ण की ठोस व द्रव प्रावस्थाओं के बीच संतुलन	1337.58	1064.43

टिप्पणी :— जहां विशेष रूप से निर्दिष्ट नहीं किया गया है, दो प्रावस्थाओं का संतुलन साधारण वात-दाब (1 atm=101325 Pa) पर मानें।

सारणी 26. **चंद पदार्थों के लिए विशिष्ट तापग्राहिता c_p, द्रवणांक t_m, द्रवण-ताप λ, क्वथनांक t_b, वाष्पीकरण का ताप r.**

पदार्थ	c_p kJ/(kg·K), 20 °C पर	t_m, °C	λ, kJ/kg	t_b, °C	r, kJ/kg
अलुमिनियम	0.88	658.3	322-394	2300	9220
इस्पात	0.46	1300-1400	205	—	—
एथिल अलकोहल	2.43	—114	105	78.3	846
एथिल ईथर	2.35	—116.3	113	34.6	351
एसीटोन	2.18	—94.3	96	56.2	524

(सारणी 26, समापन)

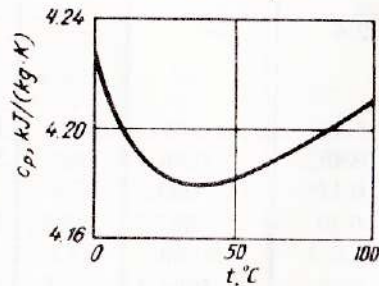
पदार्थ	c_p kJ/(kg·K), 20 °C पर	t_m, °C	λ kJ/kg	t_b, °C	r, kJ/kg
कार्बन डाइसल्फाइड	1.006	—112	66.6	46.2	348
ग्लीसीरीन	2.4	—	176	290	825
चांदी	0.235	961.9	88	2184	2350
जर्मेनियम	0.31	958	478	2700	—
टिन	0.23	231.9	59	2270	3020
टोलुएन	1.73	—95.1	72.1	110.7	365
ढलवां लोहा	0.50	1100-1200	96-138	—	—
तांबा	0.39	1083	214	2360	5410
निकेल	0.46	1452	243-306	3000	7210
नैफ्थेलिन	1.3	80.3	151	218	316
पारा	0.138	—38.9	11.73	356.7	285
पीतल	0.38	900	—	—	—
पोटैशियम	0.763	64	60.8	760	2080
फ्लोरोप्लास्ट	0.92-1.05	—	—	—	—
बर्फ (पानी)	0.50	1100-1200	96-138	—	—
बिस्मथ	0.13	271	50	1560	855
बेंजोल	1.705	5.5	127	80.2	396
मैग्नीशियम	1.3	651	373	1103	5450
लकड़ी :					
चीड़, 8% आर्द्रता (भार के अनुसार)	1.7	—	—	—	—
बलूत, 6-8% आर्द्रता (भारानुसार)	2.4	—	—	—	—
लीथियम	4.40	186	628	1317	20500
लोहा	0.45	1530	293	3050	6300
वुड का मिश्रधातु	0.17	65.5	35	—	—
सीसा	0.13	327.3	22.5	1750	880
सोडियम	1.3	98	113	883	4220
सोना	0.13	1064.4	66.6	2800	1575

सारणी 27. **द्रवण के दरम्यान पदार्थ के आयतन में सापेक्षिक परिवर्तन**

पदार्थ	$\frac{\Delta V}{V}$, %	पदार्थ	$\frac{\Delta V}{V}$, %
अलुमीनियम	6.6	पारा	3.6
अलुमीनियम के मिश्रधातु	4.5-5.9	पोटेशियम	2.41
इंडियम	2.5	बर्फ (पानी)	—8.3
इस्पात, कार्बन मिश्रित	4.5-6.0	बिस्मथ	—3.32
एंटीमनी	—0.94	भूरा लोहा	2.4-3.6
कैडमियम	4.74	मैग्नीशियम	4.2
गैलियम	—3	लीथियम	1.5
चांदी	4.99	सीजियम	2.6
जस्ता	6.9	सीसा	3.6
टिन	2.6	सोडियम	2.5
ताम्र के मिश्रधातु	3.0-4.5	सोना	5.19

सारणी 28. **अग्नि-सह पदार्थों के द्रवणांक**

पदार्थ	t, °C	पदार्थ	t, °C
टैटेलियम व जिर्कोनियम के कार्बाइड	3500-3900	टैंटेलम	2950
टंग्स्टन	3416	नियोबियम	2415
जिर्कोनियम व हैफनियम के बोराइड	3000-3200	जिर्कोनियम	1860
		टिटैनियम	1750

पानी की ताप-ग्राहिता

चित्र 22. भिन्न तापक्रमों पर पानी की विशिष्ट ताप-ग्राहिता।

सारणी 29. **अल्प तापक्रमों पर ठोस पदार्थों की तापग्राहिताएं** [J/(kg·K)]

पदार्थ	तापक्रम, K							
	20 (H_2 का क्वथन)	50	77 (N_2 का क्वथन)	90 (O_2 का क्वथन)	100	150	200	298
अलुमीनियम	10.3	144	349	426	485	686	800	900
इस्पात (स्टेनलेस)	4.6	67	163	214	244	364	424	477
क्वार्ट्स (द्रवीभूत)	25.7	115	201	244	274	420	540	740
तांबा	7.9	98	202	237	260	331	366	396
निकेल	5.0	68.6	168	209	238	336	392	445
फ्लोरोप्लास्ट-4 (टेफ्लोन)	77.6	210	316	364	399	553	695	1120
लोहा	4.6	54	147	189	221	332	393	447

टिप्पणी :— 0 से 300 °C तक के तापक्रम-अंतराल में तांबे की औसत तापग्राहिता 410 J/(kg·K) है और द्रव क्वार्ट्स का– 880 J/(kg·K)।

सारणी 30. **भिन्न तापक्रमों व दाबों पर द्रव एथिल अल्कोहल की तापग्राहिता** [c_p, kJ/(kg·K)]

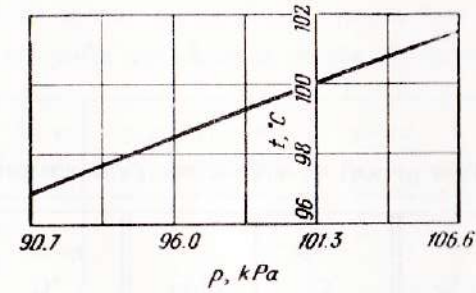
दाब, MPa	तापक्रम °C						
	—60	—40	—20	0	20	40	60
0.98	1.59	1.79	1.99	2.20	2.41	2.62	2.84
5.8	1.59	1.78	1.98	2.17	2.38	2.58	2.79

दाब, MPa	तापक्रम, °C						
	80	100	120	140	160	180	200
0.98	3.06	3.28	3.52	3.75	—	—	—
5.8	3.00	3.21	3.44	3.66	3.90	4.19	4.57

सारणी 31. सामान्य दाब पर गैसों की विशिष्ट तापग्राहिता
$[c_p, kJ/(kg.K)]$

तापक्रम, °C	आक्सीजन		हवा		कार्बन डायक्साइड		जलवाष्प		एथिल अल्कोहल	
	c_p	$\frac{c_p}{c_V}$	c_p	$\frac{c_p}{c_V}$	c_p	$\frac{c_p}{c_V}$	c_p	$\frac{c_p}{c_V}$	c_p	$\frac{c_p}{c_V}$
0	0.9149	1.397	1.006	1.400	0.8148	1.301	—	—	1.341	1.16
100	0.934	1.385	1.010	1.397	0.9136	1.260	1.103	1.28	1.689	1.12
200	0.964	1.37	1.027	1.390	0.9927	1.235	1.978	1.30	2.011	1.10
300	0.9948	1.353	1.048	1.378	1.057	1.217	2.015	1.29	2.321	1.08
600	1.069	1.321	1.115	1.345	1.192	1.188	2.208	1.26	3.168	1.06

सारणी 32. वाष्पीकरण का ताप

पदार्थ	तापक्रम, °C	r, kJ/kg	पदार्थ	तापक्रम, °C	r, kJ/kg
किरासन	160-230	210-230	पेट्रोल	50-120	230-314
क्लोरोफोर्म	61.2	247	फ्रेयोन-11	0	189
गंधकाम्ल	—	512	$(CFCl_3)$		
ग्लीसरीन	100	828	फ्रेयोन-12	0	155
नाइट्रिक अम्ल	—	482	(CF_2Cl_2)		
नैफ्थेलीन	220	316	हवा (20% आक्सीजन)	—	213

चित्र 23. वात-दाब पर पानी (H_2O) के क्वथनांक की निर्भरता।

सारणी 33. **भिन्न तापक्रमों पर वाष्पीकरण का ताप**
(r, kJ/kg)

t, °C	अल्कोहल			एथिल ईथर	एसीटिक अम्ल	बेंजोल
	मेथिल	एथिल	प्रोपिल			
0	1220	927	—	388	—	—
20	1190	925	—	367	352	—
40	1160	920	—	347	365	—
60	1130	891	—	329	376	—
80	1090	866	726	308	384	401
100	1030	827	688	287	387	383
120	974	773	642	261	396	363
140	906	717	598	234	385	347
160	831	658	541	193	376	331
180	743	584	488	134	368	313
200	688	487	429	—	358	288
220	472	370	358	—	344	261
240	—	169	266	—	328	227
260	—	—	141	—	303	184
280	—	—	—	—	266	115

सारणी 34. **भिन्न तापक्रमों पर कार्बन-डायक्साइड के वाष्पीकरण का ताप**

तापक्रम, °C	r, kJ/kg	तापक्रम, °C	r, kJ/kg	तापक्रम, °C	r, kJ/kg
—50	338	—10	262	30	63
—40	320	0	237	31.1	0.0
—30	304	20	155		

सारणी 35. **द्रवीभूत गैसों के लिये त्रिगुण-बिंदु पर द्रवणांक T_m, द्रवण का मोलीय ताप λ, क्वथनांक T_b (सामान्य दाब पर) तथा वाष्पीकरण का ताप r.**

द्रवीभूत गैस	T_m, K	λ, J/mol	T_b, K	r, J/mol
ऑक्सीजन	54.4	445	90.2	6840
आर्गन	83.8	1180	87.3	6610
कार्बन डायक्साइड	216.4 (0.505 MPa पर)	7950	194.7 (ऊर्ध्व-पातन)	16500 5530
नाइट्रोजन	63.2	713	77.3	1770
नियोन	24.6	366	27.1	6460
फ्लोरीन	55.2	1520	85.2	6080
हवा	60	—	81	944
हाइड्रोजन	14.0	117	20.4	93.8
हीलियम	—	14	4.2	

टिप्पणी :— द्रवण का ताप त्रिगुण-बिंदु पर द्रवणांक के अनुरूप होता है और वाष्पीकरण का ताप—सामान्य दाब पर क्वथनांक के अनुरूप।

सारणी 36. **सामान्य दाब पर साधारण नमक के भिन्न सान्द्रताओं वाले जलीय घोलों के घनत्व, जमनांक और क्वथनांक**

20 °C पर घोल का घनत्व ρ, Mg/m^3	NaCl की सांद्रता kg प्रति 100 kg पानी	जमनांक °C	क्वथनांक °C
1.009	1.5	—0.9	100.2
1.02	3.0	—1.8	100.4
1.05	7.5	—4.4	101.2
1.10	15.7	—9.8	102.7
1.15	25.0	—16.0	104.9
1.17	30.1	—21.2	106.2

सारणी 37. सामान्य दाब पर लवणों के जलीय घोलों के महत्तम क्वथनांक

लवण	क्वथनांक पर सान्द्रता, kg लवण प्रति 100 kg पानी	t, °C
$Ba(NO_3)_2$	27.5	101.7
$CaCl_2$	305	178
$CuSO_4$	82.2	104.2
KI	220	185
LiCl	151	168
NaCl	40.7	108.8
$NaNO_3$	222	120

टिप्पणी :—सान्द्रताएं ऐसी दी गयी है, जिन पर घोलों के क्वथनांक महत्तम होते है।

सारणी 38. साधारण व भारी जल के गुण

	द्रवणांक t_{dr}, °C	महत्तम घनत्व का तापक्रम $t_{m.g.}$ °C	क्वथनांक t_{kw}, °C	चरम तापक्रम °C	चरम दाब, MPa	घनत्व ρ, Mg/m³	
						चरम अवस्था मे	महत्तम
जल	0	3.98	100	374.15	22.11	0.307	1
भारी जल	3.82	11.23	101.43	371.5	21.8	0.338	1.106

सारणी 39. चरम परामितक

द्रव्य	t_{ch}, °C	p_{ch}, MPa	ρ_{ch}, Mg/m³
आक्सीजन	—118.8	5.03	0.430
एसीटोन	235	4.76	0.268
एसीटिक अम्ल	321.6	5.79	0.351
एथिल अल्कोहल	243.1	6.38	0.276
कार्बन डायक्साइड	31.1	7.39	0.460
टोलुएन	320.6	4.21	0.292
नाइट्रोजन	—147.1	3.39	0.311
नैफ्थेलीन	468.2	3.97	—
पानी	374.15	22.9	0.315
प्रोपिल अल्कोहल	263.7	5.07	0.273
बेंजोल	288.6	4.83	0.304
मिथेन	—82.5	4.64	0.162
मेथिल अल्कोहल	240	7.97	0.272
हाइड्रोजन	—239.9	1.3	0.031
हीलियम	—267.9	0.2	0.069

सारणी 40. त्रिगुण बिंदुओं के लिए तापक्रम व दाब

द्रव्य	T, K	p, kPa
अमोनिया	195.5	6.06
आक्सीजन	54.361	0.15
कार्बन डायक्साइड	216.58	518
नाइट्रोजन	63.14	12.53
नियोन	24.56	43.1
पानी	273.16	0.61
पैरा हाइड्रोजन	13.81	7.04
बेंजोइक अम्ल	395.51	—

सारणी 41. संतृप्त जलवाष्प के गुण

दाब 10^5 Pa	तापक्रम t, °C	विशिष्ट आयतन, m^3/kg	वाष्पन का विशिष्ट ताप r, kJ/kg
0.0059	0	207	2500
0.0196	17.2	63.3	2457
0.098	45.4	14.96	2388
0.196	59.7	7.8	2360
0.392	75.4	4.071	2322
0.588	85.45	2.785	2297
0.784	93.0	2.127	2278
0.88	96.2	1.905	2269
0.98	99.1	1.726	2262
1.013	100	1.674	2260
1.209	105	1.42	2242
1.76	116.3	0.996	2215
1.96	119.6	0.902	2206
2.94	132.9	0.617	2168
3.92	142.9	0.4708	2137
4.90	151.1	0.3818	2111
5.88	158.1	0.3214	2088
6.86	164.2	0.2778	2067
7.84	169.6	0.2448	2048
8.82	174.5	0.2189	2031
9.8	179.0	0.1980	2014
11.8	187.1	0.1663	1984
13.7	194.1	0.1434	1956
15.7	200.4	0.1261	1930
17.6	206.2	0.1125	1907
19.6	211.4	0.1015	1882
29.4	232.8	0.0679	1790
39.2	249.2	0.0506	1712
55.0	270	0.0356	1605
74.4	290	0.0255	1480

(सारणी 41, समापन)

दाब 10^5 Pa	तापक्रम t, °C	विशिष्ट आयतन m^3/kg	वाष्पन का विशिष्ट ताप r, kJ/kg
99	310	0.0183	1320
128	330	0.0130	1140
166	350	0.00881	893
211	370	0.00493	440
220.6	374	0.00347	113
221.1	374.15	0.00317	0

सारणी 42. द्रवों का आयतनी प्रसार-गुणक
(20 °C पर)

द्रव्य	β 10^{-4} K^{-1}	द्रव्य	β 10^{-4} K^{-1}
एथिल अल्कोहल	11.0	पानी 5-10 °C पर	0.53
एथिल ईथर	16.3	पानी 10-20 °C पर	1.50
एनीलीन	8.5	पानी 20-40 °C पर	3.02
एसीटोन	14.3	पानी 40-60 °C पर	4.58
कार्बन डायसल्फाइड	11.9	पानी 60-80 °C पर	5.87
क्लोरोफार्म	12.8	पारा	1.8
किरासीन	10.0	पेट्रोलियम	9.2
ग्लीसरीन	5.0	प्रोपिल अल्कोहल	9.8
टर्पेन्टाइन	9.4	बेंजोल	10.6
टोलुएन	10.8	मेथिल अल्कोहल	11.9
नाइट्रिक अम्ल	12.4		

सारणी 43. **ठोस पदार्थों के रैखिक प्रसार-गुणक**

(20 °C के निकटवर्ती तापक्रमों के लिये)

द्रव्य	α, $10^{-6}\,K^{-1}$	द्रव्य	α, $10^{-6}\,K^{-1}$
अलुमीनियम	22.9	निकेल	13.4
इनवार (36.1% Ni)	0.9	पीतल	18.9
इरीडियम	6.5	पोर्सलेन	3.0
इस्पात, कार्बन	11.1-12.6	प्लैटिनम	8.9
,, स्टेनलेस	9.6-16.0	प्लैटिनम-इरीडियम (धातुमिश्र)	8.7
ईंट का अस्तर	5.5		
एबोनाइट	70	बर्फ (—10° से 0° तक)	50.7
कंस्टैंटेन	17.0	बिस्मथ	13.4
काँच (पाइरेक्स)	3.0	मैग्नीशियम	25.1
काँच (साधारण)	8.5	लकड़ी, रेशों के अनुतीर	2-6
काँसा	17.5	लकड़ी, रेशों के अनुप्रस्थ	50-60
कार्बन (ग्रैफाइट)	7.9	लोहा, कच्चा	10-12
क्वार्ट्‌स (पिघला हुआ)	0.5	लोहा, ढलवां	10.2
ग्रैनाइट	8.3	लोहा, पिटवा	11.9
जर्मन सिल्वर	18.4	विनील प्लास्टिक	70
जस्ता	30.0	सिमेंट और कंक्रीट	12.0
टंग्स्टन	4.3	सीसा	28.3
टिन	21.4	स्वर्ण	14.5
ड्यूरालुमीनियम	22.6	हीरा	0.91
तांबा	16.7		

सारणी 44. **भिन्न तापक्रमों पर रैखिक प्रसार-गुणक**

(α, $10^{-6}\,K^{-1}$)

द्रव	तापक्रम, K				
	0	40	100	200	300
अलुमीनियम	0	1	11	19.5	23
इस्पात, अल्पकार्बन युक्त	0	0.5	5	10	11.5
इस्पात, स्टेनलेस	0	—0.2	8	13.5	16
काँच (पाइरेक्स)	0	—0.5	1.6	2.5	3.2
टिटैनियम	0	0.5	4	7	8.5
तांबा	0	1	9.5	15	17.5
फ्लोरो प्लास्टिक-4 (टेफ्लोन)	0	35	55	95	282

सारणी 45. **द्रवों का तलीय तनाव**

(20 °C पर)

द्रव्य	α, mN/m	द्रव्य	α, mN/m
अंडी का तेल	36.4 (18 °C)	जैतून का तेल	33.06 (18 °C)
एथिल अल्कोहल	22.8	टोलुएन	28.5
एथिल ईथर	16.9	नाइट्रिक अम्ल	59.4
एनीलीन	42.9	नाइट्रो बेंजीन	43.9
एसीटोन	23.7	पानी	72.8
एसीटिक अम्ल	27.8	पेट्रोलियम	26
किरासीन	28.9 (0 °C)	प्रोपिल अल्कोहल	23.8
		बेंजोल	29.0
गंधकाम्ल 85%	57.4	मेथिल अल्कोहल	22.6
ग्लीसरीन	59.4		

सारणी 46. **भिन्न तापक्रमों पर पानी और एथिल अल्कोहल के तलीय तनाव (σ, mN/m)**

द्रव्य	तापक्रम, °C					
	0	30	60	90	120	150
एथिल अल्कोहल	24.4	21.9	19.2	16.4	13.4	10.1
पानी	75.6	71.18	66.18	60.75	54.9	48.63

द्रव्य	तापक्रम, °C				
	180	210	240	300	370
एथिल अल्कोहल	6.7	3.3	0.1	—	—
पानी	42.25	35.4	28.57	14.40	0.47

सारणी 47. **द्रवावस्था में धातुओं के तलीय तनाव**

धातु	तापक्रम, °C	α, mN/m	धातु	तापक्रम, °C	α, mN/m
अलमीनियम	750	520	पारा	300	405
बिस्मथ	300	376		354	394
	400	370	पोटैशियम (CO_2 के वातावरण में)		
	500	363			
सीसा	350	442		64	410
	450	438	सोडियम	100	206.4
	500	431		250	199.5
पारा	20	465	टिन	300	526
	112	454		400	518
	200	436		500	510

सारणी 48. **पदार्थों के तापचालकता गुणांक**

पदार्थ	आर्द्रता, भार के % अंशों में	λ, W/(m·K)
	धातु	
अलुमीनियम	—	209.3
इस्पात	—	45.4
चांदी	—	418.7
ढलवा लोहा	—	62.8
तांबा	—	389.6
पारा	—	29.1
पीतल	—	85.5
लोहा	—	74.4
स्वर्ण	—	312.8
	ताप-पृथक्कारी पदार्थ	
ऊनी रेशे	वायु-शुष्क	0.047-0.058
ऐस्बेस्टस के कागज	"	0.177-0.134
" " गत्ते	"	0.157
" " रेशे	"	0.052-0.093
काँचर रूई	—	0.035-0.081
पीट स्लैब (दलदल में सड़े वनस्पतियों का तख्ता)	—	0.047-0.07
फेनिल कंक्रीट	वायु-शुष्क	0.07-0.32
" काँच	वायु-शुष्क	0.073-0.107
" प्लास्टिक	वायु-शुष्क	0.043-0.058
भट्ठी का धातुमल	वायु-शुष्क	0.238-0.372
मिपोरा (Formaldehydeurea foam)	—	0.038
संपीडित सरकंडों से बना तख्ता	वायु-शुष्क	0.105
	विविध	
ईंट का अस्तर	वायु-शुष्क	0.67-0.87
काँच (साधारण)	—	0.74
काग	0	0.042-0.054
कागज, साधारण	वायु-शुष्क	0.14
गत्ता	वायु-शुष्क	0.14-0.35
ग्रावेल	वायु-शुष्क	0.36

(सारणी 48, समापन)

पदार्थ	आर्द्रता, भार के % अंशों में	λ, W/(m·K)
ग्रेनाइट	—	3.14
चमड़ा	वायु-शुष्क	0.14-0.16
चीड़, रेशों के अनुतीर	8	0.35-0.41
,, ,, ,, अनुप्रस्थ	8	0.14-0.16
धातुमल से बना कंक्रीट	13	0.698
प्लास्टर (दीवार पर)	6-8	0.791
फ्लोरोप्लास्टिक-3	—	0.058
फ्लोरोप्लास्टिक-4	—	0.233
बर्फ	—	2.21
बलूत की लकड़ी, रेशों के अनुतीर	6-8	0.35-0.43
,, ,, ,, ,, ,, अनुप्रस्थ	6-8	0.2-0.21
बैकेलाइट वार्निश	—	0.29
मिट्टी	15-20	0.7-0.93
लौह कंक्रीट	8	1.55
विनील प्लास्टिक	—	0.13
शैल-चूरन का कंक्रीट	8	1.28
हिम, आकाश से बरसे रूई के फाहे (पिघलने की तैयारी में)	—	0.64
,, ,, (संपीडित)	—	0.35
,, ,, (ताजा गिरा हुआ)	—	0.105

सारणी 49. भिन्न तापक्रमों पर ऐस्बेस्टस और फेनिल (झांवा) कंक्रीट की तापचालकता

$\lambda(\rho_{asb} = 576\ kg/m^3,\ \rho_{ph} = 400\ kg/m^3)$

द्रव्य	t, °C				
	—18	0	50	100	150
ऐस्बेस्टस	—	1.15	0.10	0.195	0.20
फेनिल कंक्रीट	0.1	0.11	0.11	0.13	0.17

सारणी 50. भिन्न तापक्रमों पर द्रवों की तापचालकता

[W(m·K)]

(संतृप्ति रेखा पर)

द्रव्य	तापक्रम, °C		
	0	50	100
अंडी का तेल	0.184	0.177	0.172
एथिल अल्कोहल	0.188	0.177	—
एनीलीन	0.19	0.177	0.167
एसीटोन	0.17	0.16	0.15
ग्लीसीरीन	—	0.283	0.288
टालुएन	0.142	0.129	0.119
पानी	0.551	0.648	0.683
मेथिल अल्कोहल	0.214	0.207	—
बेंजोल	—	0.138	0.126
वैजलीन तैल	0.126	0.122	0.119

सारणी 51. **मानक दाब पर गैसों की तापचालकता**

द्रव्य	तापक्रम, °C	λ, 10^{-4} W/(m·K)
ऑक्सीजन	20	262
आर्गन	41	187
कार्बन डायक्साइड	20	162
नाइट्रोजन	15	251
मिथेन	0	307
हवा	20	257
हाइड्रोजन	15	1754
हीलियम	43	1558

सारणी 52. **गैसों के दाब का तापक्रम-गुणांक**

(आयतनी प्रसार गुणक)

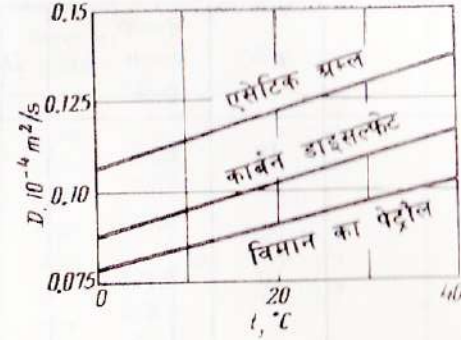
गैस	अमोनिया	ऑक्सीजन	कार्बन डायक्साइड	नाइट्रोजन	हवा CO_2 मुक्त	हाइड्रोजन	हीलियम
α, 10^{-3} K^{-1}	3.802	3.674	3.726	3.674	3.674	3.662	3.660

सारणी 53. मानक वातावरण

ऊँचाई, m	दाब $\frac{p}{p_0}$	घनत्व $\frac{\rho}{\rho_0}$	तापक्रम °C
0	1	1	15
1000	0.887	0.907	8.5
2000	0.784	0.822	2
3000	0.692	0.742	—4.5
4000	0.608	0.669	—11
5000	0.533	0.601	—17.5
6000	0.465	0.538	—24
7000	0.405	0.481	—30.5
8000	0.351	0.428	—37
9000	0.303	0.381	—43
10000	0.261	0.337	—50

टिप्पणी : — p_0 व ρ_0 क्रमशः दाब व घनत्व हैं—सागर-स्तर पर 15 °C तापक्रम की परिस्थिति में।

सारणी 54. हवा में गैसों व वाष्पों का विसरण-गुणांक
(0 °C तापक्रम व मानक दाब पर)

गैस	D, 10^{-4} m²/s	गैस	D, 10^{-4} m²/s
अमोनिया	0.2	जलवाष्प	0.21
ऑक्सीजन	0.18	टॉलूएन	0.07
एथिल अल्कोहल	0.10	पेट्रोल	0.079
एथिल ईथर	0.08	बेंजोल	0.078
एसीटिक अम्ल	0.107	मिथेन	0.2
एसीटीलीन	0.19	मेथिल अल्कोहल	0.13
कार्बन डायक्साइड	0.14	हाइड्रोजन	0.64
कार्बन डायसल्फाइड	0.09		

चित्र 24. हवा में गैसों के विसरण-गुणांक की तापक्रम पर निर्भरता।

सारणी 55. जलीय घोलों का विसरण-गुणांक

घुल्य	t, °C	घोल की सान्द्रता mol/l	D, 10^{-5} cm²/s
अमोनिया	12	1.0	1.64
	4	3.55	1.23
एथिल अल्कोहल	11	0.05	0.84
		0.25	0.80
		0.75	0.72
		3.75	0.52
कैल्सियम क्लोराइड	9	0.29	0.79
		0.37	1.09
		1.5	0.84
कॉपर सल्फेट (तूतिया)	17	0.10	0.45
		0.50	0.34
		0.95	0.27
गन्ने की चीनी	18.5	0.30	0.36
		0.97	0.28
		1.97	0.50

(सारणी 55, समापन)

घुल्य	t, °C	घोल की सान्द्रता mol/l	D, 10^{-5} cm²/s
गंधकाम्ल	18	0.35	1.53
		2.85	1.85
		4.85	2.20
ग्लीसरीन	10	0.125	0.63
		0.875	0.40
		1.75	0.35
नाइट्रिक अम्ल	19.5	0.10	2.4
		0.90	2.62
		3.90	2.85
पोटाशियम क्लोराइड	25	0.02	1.95
	18.5	1.0	1.61
		2.0	1.73
रजत नाइट्रेट	12	0.02	1.19
		0.10	1.13
		0.90	1.02
		3.9	0.61
सोडियम क्लोराइड	15	0.02	1.09
		0.1	1.09
		0.9	1.12
		3.9	1.18
हाइड्रोक्लोरिक अम्ल	19.2	0.10	2.56
		0.90	3.04
		3.20	4.5

सारणी 56. **ठोस पदार्थों में विसरण और स्वविसरण के गुणांक**

विसरक पदार्थ	विसरण का माध्यम	D_0, cm²/s	Q
कार्बन	α-लोहा	$2\cdot10^{-2}$	10050
कार्बन	γ-लोहा	$1.9\cdot10^{-2}$	14150
तांबा	लोहा	3.0	30500
तांबा	निकेल	$1.01\cdot10^{-3}$	17750
तांबा	चांदी	$5.9\cdot10^{-5}$	12400
नाइट्रोजन	α-लोहा	$6.6\cdot10^{-3}$	9300
रजत	रजत	0.9	23000
लोहा	तांबा	$1.6\cdot10^{6}$	46510
सीसा	सीसा	6.6	14000
स्वर्ण	स्वर्ण	9.2	31450
हाइड्रोजन	α-लोहा	$2.2\cdot10^{-3}$	1450
γ-लोहा	γ-लोहा	0.7	34000

टिप्पणी :—सांख्यिक मान अनुभवपरक सूत्र $D=D_0e^{-Q/T}$ से प्राप्त हुए हैं, जिसमें T केल्विन में परम तापक्रम है।

सारणी 57. **अणुओं के गैसीय-गतिक व्यास**

द्रव्य	व्यास d, nm	द्रव्य	व्यास d, nm
आक्सीजन	0.356	नाइट्रोजन	0.37
आर्गन	0.36	नियोन	0.354
कार्बन डायक्साइड	0.454	पारा	0.30
क्रिप्टन	0.314	मिथेन	0.444
क्लोरीन	0.544	हाइड्रोजन	0.27
क्सेनन	0.40	हीलियम	0.215

सारणी 58. **ईंधनों के दहन का विशिष्ट ताप**

ईंधन	W_h, MJ/kg		W_l, MJ/kg	
	ठोस			
कोयला (ऊँची लपट वाला, Д)	31.0-32.0		21.1-24.0	
कोलतार (सूखा)	30.0		—	
डिनामाइट 75%	—		5.4	
पत्थर कोयला (A मार्का)	32-34		19-27	
पीट (दलदल में सड़ी घास)	22.0-25.0		8.4-11.0	
बारूद	—		3.0-3.1	
भूरा कोयला	25.0-29.0		10.0-17.0	
भूमी (ज्वलनशील)	27.0-33.0		6.3-8.4	
लकड़ी	19.0		10.0	
	द्रव			
एथिल अल्कोहल	—		27.2	
किरासीन, व्यापारिक	—		43.0	
डीजल ईंधन, मोटर गाड़ी के लिये	—		42.7	
पेट्रोल, उच्चकोटि का	—		44.1	
पेट्रोल, तीसरी कोटि का	—		43.6	
मोबिल (fuel oil)	—		39.0-41.0	
	गैसीय (0 °C, 1013 hPa पर)			
	MJ/kg	MJ/m^3	MJ/kg	MJ/m^3
एसीटीलीन	50	58.2	48.2	56
कार्बन मोनोक्साइड	10.2	12.7	—	—
कोक-गैस (परिष्कृत)	—	—	34.8	16.4
प्राकृतिक गैस	—	—	42-47	33-36
प्रोपेन	50.4	101	46.6	94
बुटान	49.6	132	46.1	123
हाइड्रोजन	142	12.8	120	10.8

टिप्पणी :—(1) ईंधन में निहित जल के वाष्पन में खर्च ताप को ध्यान में रखे बिना कलित दहन का ताप **दहन का उच्च ताप** W_h कहलाता है और उसे ध्यान में रखकर कलित—**दहन का निम्न ताप** W_l ।

(2) गैसीय ईंधन का दहन-ताप प्रति घनमीटर में भी कलित होता है (मानक परिस्थितियों में) ।

सारणी 59. वान डेर वाल्स का स्थिरांक

द्रव्य	a, J·m^3/mol^2	b, 10^{-6} m^3/mol
अमोनिया	0.422	37.2
आक्सीजन	0.138	31.8
आर्गन	0.136	32.3
एथिल अल्कोहल	1.22	84
एथिल ईथर	1.75	134
एसीटोन	1.58	98.5
क्रिप्टन	0.234	39.9
क्सेनन	0.415	51
नाइट्रोजन	0.141	39.2
नियोन	0.21	17.1
पानी	0.555	30.5
पारा	0.82	16.7
प्रोपिल अल्कोहल	1.5	101
प्रोपेन	0.92	84.5
बेंजोल	1.85	115
मिथेन	0.228	27.1
मेथिल अल्कोहल	0.95	67
हाइड्रोजन	0.0245	26.6
हीलियम	0.0035	23.8

सारणी 60. **हवा की सापेक्षिक आर्द्रता की शीतमापीय सारणी**

शुष्क बल्ब वाले थर्मामीटर का पठन, °C	शुष्क व नम बल्ब वाले थर्मामीटरों के पठनों में अन्तर, °C										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	100	81	63	45	28	11	—	—	—	—	—
2	100	84	68	51	35	20	—	—	—	—	—
4	100	85	70	56	42	28	14	—	—	—	—
6	100	86	73	60	47	35	23	10	—	—	—
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7	—	—
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	4	—
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	—
14	100	90	79	70	60	51	42	33	25	17	9
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
18	100	91	82	73	64	56	48	41	34	26	20
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
26	100	92	85	78	71	64	58	50	45	40	34
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

टिप्पणी :—सापेक्षिक आर्द्रता **शीतमापी** (psychrometer) की सहायता से ज्ञात करते हैं; यह दो थर्मामीटरों से बना होता है, जिसमें से एक की घुंडी सूखी रहती है और दूसरे की भीगे कपड़े से लपेटी रहती है। सारणी 60 की सहायता से सापेक्षिक आर्द्रता ज्ञात करने के लिए सूखे व नम थर्मामीटरों के दिए गये पठनांतर वाले स्तंभ व सूखे थर्मामीटर के पठन वाली पंक्ति के कटान बिन्दु पर स्थित संख्या को खोजते हैं।

यांत्रिक दोलन और तरंगें

मूल अवधारणाएं और नियम

1. संनादी दोलन

किसी मध्यवर्ती स्थिति (जैसे स्थायी संतुलन की स्थिति) के आस-पास अपने को दुहराते रहने वाली सीमित गति (या सीमित अवस्था-परिवर्तन) **दोलन-गति** (या सिर्फ **दोलन**) कहलाती है।

दोलन करने वाले व्यूह **दोलक व्यूह** कहलाते हैं। सिर्फ यांत्रिक राशियों (जैसे स्थानांतरण, वेग, त्वरण, दाब आदि) से लांछित होने वाले दोलन **यांत्रिक दोलन** कहलाते हैं।

आवर्ती (मीआदी) **दोलन** ऐसे दोलनों को कहते हैं, जिसमें परिवर्तनशील राशि अपना प्रत्येक मान असीम संख्या बार समान कालांतरों पर दुहराती रहती है। समय का सबसे छोटा अंतराल T, जिसके बीतने पर परिवर्तनशील राशि का प्रत्येक मान दुहराता रहता है, **दोलन-काल** (या **दोलन का आवर्त-काल**) कहलाता है।

राशि $\nu = \frac{1}{T}$ को आवर्ती दोलनों की **आवृत्ति (बारंबारता)** कहते हैं। आवृत्ति ν को हर्ट्‌स (Hz) में व्यक्त करते हैं। 1 Hz ऐसे आवर्ती दोलनों की आवृत्ति है, जिसका आवर्तकाल 1s है।

संनादी दोलन किसी राशि में होने वाले ऐसे परिवर्तन को कहते हैं, जिसे **ज्यावत (या कोज्यावत) नियम** द्वारा निरूपित किया जा सकता है :

$$u = A \sin(\omega t + \varphi), \qquad (3.1)$$

जहां A=परिवर्तनशील राशि का अधिकतम मान (मापांक में) है; इसे **संनादी दोलनों का आयाम** कहते हैं। $\omega t + \varphi$ को संनादी दोलन की **प्रावस्था** कहते हैं; φ=**आरंभिक प्रावस्था**, ω=**कोणिक या चक्रीय आवृत्ति**। चक्रीय आवृत्ति ω और दोलनों की आवृत्ति ν निम्न सूत्र द्वारा बंधे हैं ;

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu. \qquad (3.2)$$

संनादी दोलन की प्रावस्था समय के दिये हुए क्षण पर इकाई आयाम वाली परिवर्तनशील राशि का मान निर्धारित करती है। प्रावस्था कोणिक इकाइयों (रेडियन या डिग्री) में व्यक्त होती है।

कोणिक या चक्रीय आवृत्ति रेडियन प्रति सेकेंड (rad/s) में व्यक्त की जाती है।

संनादी दोलन का एक उदाहरण है वृत्त की परिधि पर समरूप कोणिक वेग ω से वलनरत गोली के प्रक्षेप की गति (चित्र 25)। गोली की स्थितियों 1 व 2 के अनुरूप x-अक्ष पर उसके प्रक्षेपों के **विचलन** (संतुलन-बिंदु 0 से प्रक्षेपों के स्थानांतरण) हैं :

$$u_1 = R \sin \alpha = R \sin \omega t,$$
$$u_2 = R \sin (\alpha + \varphi) = R \sin (\omega t + \varphi).$$

समान आवृत्ति, पर भिन्न आरंभिक प्रावस्था वाले दोलन को **प्रावस्थांतरित दोलन** कहते हैं। **प्रावस्था-अन्तर** आरंभिक प्रावस्थाओं के अंतर को कहते हैं। समान आवृत्ति वाले दो दोलनों की प्रावस्थाओं का अंतर समय मापने के लिये आरंभिक क्षण के चयन पर निर्भर नहीं करता। उदाहरणार्थ, यदि चित्र 25 में 1 व 2 दो गोलियों की स्थितियां हैं, तो समय

चित्र 25. वृत्ताकार पथ पर वलनरत बिंदु के प्रक्षेप का संनादी दोलन।

मापने के लिये कोई भी आरंभिक क्षण क्यों न चुना जाये, गोलियों के प्रक्षेपों के लिये प्रावस्थांतर हमेशा φ रहेगा (यदि गोलियों की आवृत्तियां समान हैं)।

पिंड का संनादी-दोलन उस पर प्रत्यास्थकल्प बल की क्रिया के कारण उत्पन्न होता है। **प्रत्यास्थकल्प बल** (या प्रत्यास्थप्राय बल) ऐसे बल को कहते हैं, जो अपनी प्रकृति के अनुसार प्रत्यास्थी बल नहीं है, पर उसकी मात्रा संतुलन की स्थिति से पिंड के स्थानांतरण की समानुपाती होती है। ये बल सदा संतुलन की स्थिति की ओर निर्दिष्ट होते हैं। प्रत्यास्थकल्प बल की गणितीय अभिव्यक्ति का रूप है

$$\mathbf{F} = -k\mathbf{u}, \qquad (3.3)$$

जहां k अनुपातिकता का गुणांक है, जिसे प्रत्यास्थकल्प बल का गुणांक कहते हैं, u=स्थानांतरण है; ऋण चिह्न दिखाता है कि बल व स्थानांतरण के सदिशों की दिशाएं विपरीत हैं।

किसी भी प्रकार के आवर्ती दोलन को किसी भी परिशुद्धता-कोटि के साथ संनादी दोलनों के योगफल के रूप में व्यक्त किया जा सकता है।*

* गणितीय विश्लेषण में सिद्ध किया जाता है कि कोई भी आवर्ती दोलन संनादी दोलनों के अनंत योगफल के रूप में, अर्थात् तथाकथित संनादी (हार्मोनिक) क्रम के रूप में व्यक्त किया जा सकता है।

2. दोलक

भौतिक दोलक हर उस लटकाये गये पिंड को कहते है, जिसमें गुरुत्व-केंद्र लटकन बिंदु से नीचे होता है। इस प्रकार से लटकाये गये पिंड में दोलन करने की क्षमता होती है।

दोलन को **बिंदु-** (या **गणितीय**) **दोलक** कहते हैं, यदि दोलनरत पिंड का सारा द्रव्यमान एक बिंदु पर संकेंद्रित माना जा सकता है। गणितीय दोलक का निकटतम साकार रूप मिल सकता है, यदि निम्न शर्तें पूरी की जा सकें: धागा लमड़नशील नहीं हो, हवा के साथ व लटकन-बिंदु पर घर्षण नगण्य हो और धागे की लंबाई की तुलना में पिंड बहुत छोटा हो। विचलन-कोण अत्यल्प होने पर गणितीय दोलक का दोलन संनादी माना जा सकता है। नीचे दिये गये सभी सूत्र ऐसे ही दोलनों के लिये हैं।

गणितीय दोलक का आवर्त-काल :

$$T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \qquad (3.4)$$

जहां l=दोलक की लंबाई, g=स्वतंत्र अभिपातन का त्वरण।

स्प्रिंग से लटके बोझ का दोलन संनादी माना जा सकता है, यदि दोलन का आयाम हूक-नियम के लागू होने की सीमा में है (दे. पृ. 44) और घर्षण-बल पर्याप्त कम हैं। बोझ का दोलन-काल (स्प्रिंग का द्रव्यमान $M \ll m$):

$$T=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}, \qquad (3.5)$$

जहां m=बोझ का द्रव्यमान, k=स्प्रिंग का कड़ापन; सांख्यिक रूप से यह स्प्रिंग को इकाई लंबाई अधिक लमड़ाने के लिये आवश्यक बल की मात्रा है।*

स्प्रिंग के प्रभाव से घूर्णन-दोलन की गति में रत पिंड को **मरोड़ी दोलक** कहते हैं (जैसे कलाई घड़ी में तुला-चक्की)। विशेष परिस्थितियों में (जब दोलन का आयाम अत्यल्प हो और घर्षण-बल भी पर्याप्त कम हों) ऐसे दोलन संनादी माने जा सकते हैं। मरोड़ी दोलक का दोलन-काल :

* सूत्र (3.5) सिर्फ स्प्रिंग से लटके बोझ की स्थिति में ही नहीं, बल्कि उन सभी स्थितियों में काम आता है, जब सूत्र (3.3) लागू हो सकता है।

$$T=2\pi\sqrt{\frac{I}{D}}, \qquad (3.6)$$

जहां I=लटकन-बिंदु से गुजरने वाले अक्ष के गिर्द पिंड का जड़त्वाघूर्ण, D=मरोड़ी कड़ापन; सांख्यिक रूप से यह पिंड को इकाई कोण पर मरोड़ देने वाले घूर्णक आघूर्ण की आवश्यक मात्रा है।

भौतिक दोलक का दोलन-काल :

$$T=2\pi\sqrt{\frac{I}{mga}}, \qquad (3.7)$$

जहां I = लटकन-बिंदु से गुजरने वाले अक्ष के गिर्द पिंड का जड़त्वाघूर्ण, a=गुरुत्व-केंद्र से इस अक्ष की दूरी, m=पिंड का द्रव्यमान, g=स्वतंत्र अभिपातन का त्वरण।

राशि $l=I/ma$ भौतिक दोलक की समानयित लंबाई है, जो ऐसे गणितीय दोलक की लंबाई के बराबर होती है, जिसका दोलन-काल दिये हुए भौतिक दोलक के दोलन-काल के बराबर होता।

3. स्वतंत्र और बाध्य दोलन

दोलक व्यूह के अंदर उत्पन्न बलों के प्रभाव से होने वाले यांत्रिक दोलन **स्वतंत्र दोलन** कहलाते हैं। यदि पिंड के स्वतंत्र दोलनों का कारण सिर्फ प्रत्यास्थकल्प बल होगा, तो वे संनादी होंगे।

प्रत्यास्थकल्प बल और घर्षण-बल (जो क्षणिक वेग u का समानुपाती है: $F_{gn}=-ru$)* के सहप्रभाव से पिंड में होने वाले दोलन **नश्वर** कहलाते है। नश्वर दोलनों में विचलन है

$$u=Ae^{-\delta t}\sin(\omega t+\varphi). \qquad (3.8)$$

धन राशि A **आरंभिक आयाम** है, δ – **नश्वरता-गुणांक**, $Ae^{-\delta t}$ – आयाम **का क्षणिक मान** और ω – चक्रीय आवृति। e प्राकृतिक लघुगणकों का आधार है। इसके अतिरिक्त,

$$\delta=\frac{r}{2m} \qquad (3.9)$$

* सूत्र में ऋण चिह्न का अर्थ है कि वेग व बल के सदिशों की दिशाएं विपरीत हैं।

$$\omega=\sqrt{\omega^2_0-\delta^2}, \qquad (3.10)$$

जहां r = प्रतिरोध का गुणांक, m = पिंड का द्रव्यमान; $\omega^2_0=k/m$, जहां

चित्र 26. नश्वर दोलन ($\varphi=0$)।

चित्र 27. भिन्न क्षीणनों के अनुनाद-वक्र। Oy अक्ष पर स्थानांतरण के सापेक्षिक आयाम Ak/F_0 लिये गये हैं, जहां A = स्थानांतरण का आयाम, F_0/k = स्थैतिक स्थानांतरण, जो क्रियाशील बल के आयाम के बराबर वाले बल द्वारा उत्पन्न होता है। Ox अक्ष पर आवृति के सापेक्षिक परिवर्तन ω/ω_0 लिये गये हैं, जहां $\omega_0=\sqrt{k/m}$ = घर्षण नहीं होने पर स्वतंत्र दोलनों की आवृति। वक्र δ/ω_0 के भिन्न मानों के लिये हैं। नन्हें वृत्त स्थानांतरण-आयाम के महत्तम मानों की स्थिति दिखाते हैं।

k = प्रत्यास्थकल्प बल का गुणांक। नश्वर दोलन चित्र 26 जैसे वक्र द्वारा दिखाये जा सकते हैं।

वाह्य आवर्ती बल के प्रभाव से पिंड में उत्पन्न होने वाले दोलन **बाध्य दोलन** कहलाते हैं। जब ज्यावत वाह्य बल का आवर्त-काल पिंड के स्वतंत्र दोलनों के आवर्तकाल के निकट होने लगता है, तब बाध्य दोलनों का आयाम तेजी से बढ़ने लगता है (चित्र 27)। इस संवृति को अनुनाद कहते हैं।

यदि घर्षण-बल बहुत बड़ा होता है (बड़ी नश्वरता), तो अनुनाद क्षीण रूप से व्यक्त होता है (दे. चित्र 27) या बिल्कुल ही व्यक्त नहीं होता (उदाहरणार्थ, $\delta/\omega_0>1$ होने पर)।

जिस दोलक व्यूह में दोलन-काल के दरम्यान होने वाली ऊर्जा-हानि ऊर्जा के आंतरिक स्रोत द्वारा पूरी की जाती है, **स्वदोलक व्यूह** कहलाता है और ऐसे व्यूह में स्वयं अपना पोषण करने वाला दोलन **स्वदोलन** कहलाता है (जैसे घड़ी के पेंडुलम का दोलन)।

4. संनादी दोलनों का संयोजन

जब पिंड एक साथ दो (या अधिक) दोलन-गतियों में रत होता है, तब समय के किसी भी क्षण पर उसका परिणामी विचलन सभी विचलनों के सदिष्ट योग के बराबर होता है।

समान आवृति व समान दिशा वाले दो संनादी दोलनों

$$u_1=A_1\sin(\omega t+\varphi_1),$$
$$u_2=A_2\sin(\omega t+\varphi_2) \qquad (3.11)$$

को जोड़ने पर परिणामी विचलन का आयाम A चित्र 28 में दर्शित समांतर

चित्र 28. समान दिशाओं वाले संनादी दोलनों में स्थानांतरण-आयामों का संयोजन।

चतुर्भुज के नियम द्वारा ज्ञात होता है। इस परिस्थिति में परिणामी विचलन होगा

$$u = A \sin(\omega t + \varphi_p), \qquad (3.12)$$

जहां

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1)},$$

$$tg\varphi_p = \frac{A_1 \sin\varphi_1 + A_2 \sin\varphi_2}{A_1 \cos\varphi_1 + A_2 \cos\varphi_2}.$$

जब पिंड एक साथ परस्पर लंब दिशाओं में समान आवृत्तियों वाले दो संनादी दोलन करता है, तब उसका विचलन निम्न समीकरणों द्वारा निर्धारित होता है :

$$\left.\begin{aligned} u_x &= A_1 \sin \omega t, \\ u_y &= A_2 \sin(\omega t + \varphi) \end{aligned}\right\} \qquad (3.13)$$

चित्र 29. परस्पर लंब संनादी दोलनों का संयोजन।

और पिंड की गति का पथ दीर्घवृत्त के समीकरण द्वारा निरूपित होता है (चित्र 29) :

$$\frac{u_x^2}{A_1^2} + \frac{u_y^2}{A_2^2} - \frac{2u_xu_y}{A_1A_2}\cos\varphi = \sin^2\varphi. \qquad (3.14)$$

$A_1 = A_2$ और $\varphi = 90°$ होने पर पिंड का **गतिपथ** वृत्त की परिधि होती है। $\varphi = 0$ होने पर पिंड *I* व *III* चतुर्थांश से गुजरने वाली सरल रेखा पर चलता है और $\varphi = \pi$ होने पर—*II* व *IV* चतुर्थांश से गुजरने वाली सरल रेखा पर।

5. तरंग

व्योम में दोलनों का सीमित वेग से प्रसरण **तरंग** कहलाता है। **दोलन व तरंग में भेद** निम्न बात से किया जाता है : यदि $L < vT$ (L=व्यूह की लंछक नापें, v=क्षोभों के प्रसरण का वेग, T=दोलन काल), तो व्यूह में बार-बार दुहराये जाने वाले परिवर्तन दोलन कहलाते हैं; यदि $L > vT$, तो ऐसे परिवर्तन तरंग कहलाते हैं। उदाहरणार्थ, छड़ के एक सिरे को ठोकने

से संकोचन (या संपीडन) की अवस्था बनती है, जो एक नियत वेग से छड़ में उसके अनुतीर प्रसरण करती है।

व्योम में क्षोभों के प्रसरण का वेग **तरंग का वेग** कहलाता है।[1] यांत्रिक तरंगों का वेग माध्यम के गुणों पर निर्भर करता है और कुछ परिस्थितियों में आवृत्ति पर भी निर्भर करता है। आवृत्ति पर तरंग-वेग की निर्भरता **वेग-प्रकीर्णन** कहलाती है।

यांत्रिक तरंगों के प्रसरण में माध्यम के कण अपने संतुलन की स्थिति के सापेक्ष दोलन करते रहते हैं। माध्यम के कणों की ऐसी गति का वेग **दोलक वेग** कहलाता है।

यदि तरंग-प्रसरण के दरम्यान माध्यम की लंछक राशियां (जैसे घनत्व, कणों का स्थानांतरण, दाब आदि) व्योम के किसी भी बिंदु पर ज्यावत नियम के अनुसार बदलती रहती हैं, तो ऐसी तरंगों को **ज्यावत** (या **संनादी**) तरंगें कहते हैं। ज्यावत तरंगों का महत्त्वपूर्ण लंछक है तरंग की लंबाई या तरंग-दैर्घ्य। **तरंग की लंबाई** λ उस दूरी को कहते हैं, जिसे तरंग एक आवर्त काल के दरम्यान तय करती है :

$$\lambda = vT. \qquad (3.15)$$

आवृत्ति ν और तरंग की लंबाई λ निम्न संबंध रखते हैं :

$$\nu = v/\lambda, \qquad (3.16)$$

जहां v=तरंग का वेग।

निम्न प्रकार का गणितीय व्यंजन

$$u = A \sin\omega\left(t - \frac{r}{v}\right) = A\sin(\omega t - kr), \qquad (3.17)$$

ज्यावत तरंगों के प्रसरण के दरम्यान माध्यम की अवस्था में होने वाले परिवर्तन को निरूपित करता है; इसे **समतली संनादी तरंगों** का समीकरण कहते हैं।[2]

---

1. क्षोभ रिक्त व्योम (ज्यामितिक व्योम) में नहीं उत्पन्न होते, वे भौतिक व्योम (द्रव्य या क्षेत्र से छेंके हुए व्योम) में उत्पन्न होते हैं और उसी में उनका प्रसरण संभव है। ऐसे भौतिक व्योम को **माध्यम** कहते हैं। **क्षोभ** से तात्पर्य है भौतिक व्योम में भौतिक बिंदु का संतुलन की स्थिति से विचलन, जो व्योम के अन्य बिंदुओं को भी क्रमशः प्रभावित करता चला जाता है। —अनु.

2. u की जगह इस समीकरण में कोई भी परामितक हो सकता है, जो माध्यम की अवस्था लंछित करता है (जैसे दाब, तापक्रम आदि)।

इस समीकरण में A = तरंग का आयाम, ω = चक्रीय आवृति, r = तरंगोत्पादक स्रोत से व्योम के उस बिंदु की दूरी, जिस पर माध्यम के किसी गुण के परिवर्तन का अध्ययन किया जा रहा है; v = तरंग का वेग, $k = 2\pi/\lambda$ = तरंगी संख्या । $\omega t - kr$ को **तरंग की प्रावस्था** कहते हैं ।

जिस सतह के सारे बिंदु समान प्रावस्था में स्थित रहते हैं, उसे **तरंगी सतह** कहते हैं ।

रूप के अनुसार तरंगी सतहें **समतल** होती हैं (समतल तरंगी सतहें), या **बेलनाकार** (बेलनाकार तरंगी सतहें), या **वर्तुल** (वर्तुल तरंगी सतहें) । बेलनाकार व वर्तुल तरंगों के समीकरण हैं :

$$u_b = \frac{A}{\sqrt{r}} \sin(\omega t - kr), \qquad (3.18)$$

$$u_w = \frac{A}{r} \sin(\omega t - kr), \qquad (3.19)$$

जहां A तरंग के स्रोत से इकाई दूरी पर तरंग के आयाम का सांख्यिक मान है ।

यदि माध्यम के कणों का विचलन तरंग-प्रसरण की समानांतर दिशा में हो रहा है, तो ऐसी तरंग को **अनुतीरी** कहते हैं; यदि कणों का विचलन तरंग-प्रसरण की दिशा के अभिलंब समतल में हो रहा है, तो तरंग को **अनुप्रस्थी** कहते हैं । तरल (द्रव व गैसीय) माध्यम में यांत्रिक तरंगें अनुतीरी होती हैं; ठोस पिंडों में अनुतीरी व अनुप्रस्थी दोनों ही प्रकार की तरंगें संभव है ।

छड़ में अनुतीरी तरंगों का वेग :

$$v_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \qquad (3.20)$$

जहां E यंग का मापांक है, ρ = घनत्व है ।

ठोस पिंड में, जिसकी अनुप्रस्थी मापें प्रसरवान तरंगों की लंबाई से बहुत बड़ी हैं, अनुतीरी तरंग का वेग होगा :

$$v_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}}, \qquad (3.21)$$

जहां ρ = द्रव्य का घनत्व, E = यंग का मापांक, μ = पुआसोन का गुणाक (दे. सारणी 17) ।

पतले पत्तरों में अनुतीरी तरंगों का वेग :

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}, \qquad (3.22)$$

द्रव में अनुतीरी तरंगों का वेग :

$$v_{dr} = \frac{\gamma}{\rho \beta_{st}}, \qquad (3.23)$$

जहां β_{st} = समतापक्रमी संपीड्यता*, $\gamma = c_p/c_V$.

अनुप्रस्थी तरंगों का वेग :

$$v_2 = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \qquad (3.24)$$

जहां G = सर्पन का मापांक (दे. पृ. 47)

गैस में ध्वनि-तरंगों का वेग :

$$v_g = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}}, \qquad (3.25)$$

जहां $\gamma = c_p/c_V$, p = दाब ।

सूत्र (3.25) आदर्श गैसों पर लागू किया जा सकता है और इस स्थिति में उसे निम्न रूप दिया जा सकता है (R, μ, T—दे. पृ. 70) :

$$v_g = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}} \qquad (3.26)$$

द्रव की सतह पर तरंगें न तो अनुतीरी होती हैं, न अनुप्रस्थी । सतही तरंगों में पानी के कणों की गति अधिक जटिल होती है (दे. चित्र 30) ।

सतही तरंगों का वेग** :

---

* संपीड्यता—दे. पृ. 47; समतापक्रमी संपीड्यता स्थिर तापक्रम पर होने वाली संपीडन-प्रक्रिया है ।

** सूत्र (2.7) द्रव व गैस के विभाजक तल पर उठने वाली तरंगों के लिये भी लागू हो सकता है, यदि द्रव का घनत्व गैस के घनत्व से बहुत अधिक होता है ।

$$v_{sat} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} + \frac{2\pi\alpha}{\lambda\rho}}, \qquad (3.27)$$

जहां g=स्वतंत्र अभिपातन का त्वरण, λ=तरंग-लंबाई, α=तलीय तनाव का गुणांक, ρ=घनत्व ।

सूत्र (3.27) तभी लागू किया जा सकता है, जब द्रव की गहराई $0.5\ \lambda$ से कम नहीं होती है ।

यदि द्रव की गहराई h कम हो (0.5λ से), तो

$$v_{sat} = \sqrt{gh}. \qquad (3.28)$$

तरंग-प्रसरण की क्रिया में ऊर्जा का स्थानांतरण होता है, पर माध्यम के कण तरंग-प्रसरण की दिशा में स्थानांतरित नहीं होते, वे संतुलन की स्थिति के गिर्द सिर्फ दोलन करते रहते हैं (यदि तरंगों का आयाम अत्यल्प है और माध्यम श्यान नहीं है)। तरंग द्वारा इकाई समय में तरंगी सतह के इकाई क्षेत्रफल के पार स्थानांतरित औसत ऊर्जा का सांख्यिक मान **तरंग की तीव्रता** कहलाता है । तीव्रता को W/m^2 में व्यक्त करते हैं । ध्वनि तरंगों की तीव्रता **ध्वनि की तीव्रता** कहलाती है ।

चित्र 30. सतही तरंगों के प्रसर में जलीय कणों के पथ :
(a) कम गहरे पानी में; (b) गहरे पानी में (अनुपात $2\pi h/\lambda \gg 1$);
(c) छिछले पानी में (अनुपात $2\pi h/\lambda \ll 1$) ।

यांत्रिक तरंगों के प्रसरण में माध्यम के कणों के वेग व त्वरण उन्हीं संनादी नियमों के अनुसार बदलते हैं, जिनके अनुसार विचलन में परिवर्तन होता है ।

यदि चक्रीय आवृत्ति ω वाली समतल संनादी तरंग के प्रसरण में कणों के विचलन के आयाम का मान u_0 होता है, तो दोलकी वेग के आयाम का मान होगा

$$u_0 = \omega u_0. \qquad (3.29)$$

त्वरण का आयाम होगा

$$a_0 = \omega^2 u_0, \qquad (3.30)$$

और तीव्रता

$$I = \frac{1}{2}\rho v u_0^2, \qquad (3.31)$$

जहां ρ=माध्यम का घनत्व, v=तरंग का वेग ।

6. स्थावर तरंग

स्थावर तरंग एक-दूसरे की ओर दौड़ती दो एकवर्णी (एक निश्चित आवृत्ति वाली) तरंगों की व्यतिक्रिया से बनती है ।

यदि कोई **समतली तरंग** (व्योम के प्रत्येक बिंदु पर समान प्रसरण-दिशा रखने वाली तरंग) अक्ष OX की धन दिशा में प्रसरित होती है और ऐसी ही दूसरी तरंग इसकी विपरीत दिशा में, तो इन तरंगों के समीकरण का रूप होगा :

$$u_1 = A_1 \cos(\omega t - kx + \varphi_1)$$
$$u_2 = A_2 \cos(\omega t - kx + \varphi_2) \qquad (3.32)$$

स्थानांतरण u_1 वाली तरंग को **धावी तरंग** कहते हैं और u_2 वाली को —**परावर्तित तरंग** ।

दिशांक-मूल और काल-मूल (जिस क्षण से समय नापना शुरू करते हैं) को इस प्रकार चुना जा सकता है कि आरंभिक प्रावस्थाएं φ_1 व φ_2 शून्य हो जायें । इससे समीकरण (3.32) का रूप कुछ सरल हो जायेगा और परिणामी तरंग के समीकरण का रूप होगा :

$$u = u_1 + u_2 = 2A_1 \cos(kx)\cos(\omega t) \qquad (3.33)$$

संबंध (3.33) ही समतली स्थावर तरंग का समीकरण है । स्थावर तरंग का आयाम

$$A = 2A_1 \cos(kx). \qquad (3.34)$$

संबंध (3.34) को संबंध (3.12) से प्राप्त किया जा सकता है, यदि $\varphi_1 = -kx$, $\varphi_2 = kx$, $A_1 = A_2$ ।

जिन बिंदुओं पर स्थावर तरंग का आयाम महत्तम मान रखता है, उन्हें **अपगम** कहते हैं; ये बिंदु शर्त $x = m\lambda/2$ ($m = 0, 1, 2, \ldots$) से निर्धारित होते हैं । समतली स्थावर तरंग के अपगम उन तलों पर बनते हैं, जिनके दिशांक शर्त $x = m\lambda/2$ ($m = 0, 1, 2, \ldots$) को पूरा करते हैं ।

स्थावर तरंग का आयाम जिन बिंदुओं पर शून्य होता है, उन्हें संगम कहते हैं; ये शर्त $x = (m + \frac{1}{2})\ \lambda/2$ ($m = 0, 1, 2, \ldots$) से निर्धारित होते हैं । समतली स्थावर तरंग के संगम उन तलों पर बनते हैं, जिनके दिशांक शर्त $x = (m + \frac{1}{2})\ \lambda/2$ ($m = 0, 1, 2, \ldots$) को संतुष्ट करते हैं ।

संगम और अपगम व्योम में एक-दूसरे के सापेक्ष चौथाई तरंग-लंबाई पर स्थानांतरित रहते हैं । समीकरण (3.33) से निष्कर्ष निकलता है कि

(*a*) भिन्न बिंदुओं पर दोलनों के आयाम एक जैसे नहीं होते; उनके मान 0 से $2A_1$ के अंतराल में बदलता रहता है;

(*b*) दो निकटतम संगमों के बीच दोलनों की प्रावस्थाएं समान होती हैं और संगम पार करते वक्त उनमें झटके से π जितना परिवर्तन होता है;

(*c*) ऊर्जा का वहन नहीं होता, अर्थात् किसी भी काट (अनुच्छेद) में औसत ऊर्जा-प्रवाह शून्य के बराबर होता है; ऊर्जा सिर्फ संगम से निकटतम अपगम की ओर प्रवाहित होती है और फिर वापस हो जाती है ।

यदि परावर्तित तरंग का आयाम धावी तरंग के आयाम से कम हो, तो संगमों पर दोलन का आयाम होगा : $(A_1 - A_2)$, जहां A_1 व A_2 क्रमशः धावी व परावर्तित तरंगों के आयाम हैं । अपगमों पर दोलन का आयाम होगा : $(A_1 + A_2)$ ।

अनुपात $(A_1 + A_2)/(A_1 - A_2)$ को **स्थावर तरंग का गुणांक** कहते हैं ।

7. ध्वनि

ध्वनि ऐसी यांत्रिक तरंगों को कहते हैं, जिनकी आवृत्तियां 17-20 से 20000 Hz की सीमा में होती हैं । आदमी का कान यांत्रिक तरंगों की इन आवृत्तियों को अनुभव करने की क्षमता रखता है । 17 Hz से नीचे की

आवृत्ति वाली ध्वनि को **अवध्वनि** कहते हैं और 20000 Hz से ऊपर वाली को **पराध्वनि** कहते हैं ।

ध्वनि की अनुभूति के साथ-साथ आदमी का कान ध्वनि की **वज्रिता** (loudness), तारता (pitch) और स्वरिता (timbre) में भेद भी करता है । ध्वनि की **वज्रिता** दोलनों के आयाम द्वारा निर्धारित होती है, **तारता**—आवृत्ति द्वारा और **स्वरिता**—अधिगुरों के (अधिक उच्च आवृत्ति वाले) दोलनों के आयाम द्वारा ।

ध्वनिक तरंगों के प्रसरण के कारण माध्यम में दाब-परिवर्तन (तरंगों की अनुपस्थिति में जो दाब होता है, उसकी तुलना में होने वाला दाब-परिवर्तन) **ध्वनि का दाब** कहलाता है । ध्वनि-दाब का आयाम $\triangle p_0$ दोलकीवेग के आयाम u_0 के साथ निम्न सूत्र द्वारा जुड़ा है :

$$\triangle p_0 = \rho v u_0. \tag{3.35}$$

माध्यम में अवशोषण के कारण समतली ध्वनिक तरंगों की तीव्रता निम्न नियम के अनुसार कम होती है :

$$I_x = I_0 e^{-2\alpha x} \tag{3.36}$$

जहां I_0—माध्यम में प्रवेश करने वाली तरंगों की तीव्रता, I_x=पथ x तय करने के बाद उनकी तीव्रता ।

ध्वनि-तरंगों का क्षीणन-स्तर निर्धारित करने वाली राशि α को **ध्वनि के अवशोषण का गुणांक** (आयाम के अनुसार) कहते हैं ।

सुनने में ध्वनिक तीव्रता की अनुभूति वज्रिता की अनुभूति के अनुरूप होती है । तीव्रता के एक नियत निम्नतम मान पर आदमी का कान ध्वनि अनुभव करने में असमर्थ रहता है । इस निम्नतम तीव्रता को **श्रव्यता की दहलीज** (अवसीमा) कहते हैं । भिन्न आवृत्तियों वाली ध्वनियों के लिए श्रव्यता की दहलीज के मान भिन्न होते हैं । बहुत अधिक तीव्रता होने पर कान में दर्द की अनुभूति होती है । दर्द की अनुभूति के लिए आवश्यक निम्नतम तीव्रता को **दर्दानुभूति की अवसीमा** (दहलीज) कहते हैं ।

ध्वनि-तीव्रता का स्तर डेसीबेल (db) नामक इकाइयों में निर्धारित करते हैं । डेसीबेलों की संख्या तीव्रता-अनुपात के दशमिक लघुगणक की दस गुनी संख्या, अर्थात् $10 \lg (I/I_0)$ है । ध्वनिकी में अक्सर I_0 की जगह $1\ pJ/(m^2 \cdot s)$ रखते हैं; यह 1000 Hz पर श्रव्यता की दहलीज के अनुरूप वाली तीव्रता के लगभग है ।

सारणी और ग्राफ

सारणी 61. **शुद्ध द्रवों और तेलों में ध्वनि-वेग**

द्रव	t, °C	v, m/s	a, m/s·K
शुद्ध द्रव			
अल्कोहल, एथिल	20	1180	−3.6
अल्कोहल, मेथिल	20	1123	−3.3
एनीलीन	20	1656	−4.6
एसीटोन	20	1192	−5.5
किरासीन	34	1295	—
ग्लीसरीन	20	1923	−1.8
पारा	20	1451	−0.46
पानी समुद्री	17	1510-1550	—
पानी साधारण	25	1497	2.5
बेन्जोल	20	1326	−5.2
तेल			
अलसी	31.5	1772	—
गैसोलीन	34	1250	—
जैतून	32.5	1381	—
ट्रान्सफॉर्मर के लिए	32.5	1425	—
तर्क् (एक झाड़ी)	32	1342	—
तोरी (rapeseed)	30.8	1450	—
देवदार (का)	29	1406	—
मूंगफली	31.5	1562	—
युकेलिप्टस	29.5	1276	—

टिप्पणी :—तापक्रम बढ़ने पर द्रव में (पानी को छोड़कर) ध्वनि-वेग घटता है। अन्य तापक्रमों पर ध्वनि-वेग सूत्र $V_t = v + \alpha(t - t_0)$ से ज्ञात किया जा सकता है, जिसमें v=सारणी में दिया गया वेग, α=तापक्रम-गुणांक (सारणी के अंतिम स्तम्भ में दिया है), t=तापक्रम, जिस पर ध्वनि-वेग ज्ञात करना है, t_0=सारणी में दिया गया तापक्रम।

सारणी 62 **ठोस पदार्थों में ध्वनि-वेग (20 °C पर)**

पदार्थ	v_0, m/s	v_1, m/s	v_2, m/s
अबरक	—	7760	2160
अलुमीनियम	5080	6260	3080
इस्पात	5170	5850	3230
एबोनाइट	1570	2405	—
काँच, क्राउन	5300	5660	3420
काँच, भारी क्राउन	4710	5260	2960
काँच, भारी फ्लिंट	3490	3760	2220
काँच, हल्का फ्लिंट	4550	4800	2950
काँच, क्वार्ट्ज	5370	5570	3515
काग	500	—	—
चूना पत्थर	—	6130	3200
जस्ता	3810	4170	2410
टिन	2730	3320	1670
तांबा	3710	4700	2260
निकेल	4785	5630	2960
पीतल	3490	4430	2123
पेरिस का प्लास्टर	—	4970	2370
पोर्सलीन	4884	5340	3120
पोलीस्टीरीन	—	2350	1120
प्लेक्सी ग्लास	—	2670	1121
बर्फ	3280	3980	1990
रबर	46	1040	27
लोहा	5170	5850	3230
संगमरमर	—	6150	3260
सीसा	2640	3600	1590
स्लेट	—	5870	2800

टिप्पणी :—v_0 छड़ में अनुदैर्ध्य तरंगों का वेग है, v_1 या v_2 अनंत माध्यम में क्रमशः अनुदैर्ध्य व अनुप्रस्थ तरंगों के वेग हैं।

सारणी 63. **भिन्न गहराइयों पर जमीन के गुण और भूकंपी तरंगों का वेग**

H, km	ρ, Mg/m^3	v_1, km/s	v_2, km/s	p, GPa	g, m/s^2
33	3.32	8.18	4.63	0.9	9.85
100	3.38	8.18	4.63	3.1	9.89
200	3.47	8.29	4.63	6.5	9.92
500	3.89	9.65	5.31	17.4	9.99
1000	4.68	11.42	6.36	39.2	9.95
2000	5.24	12.79	6.93	88	9.86
4000	10.8	9.51	—	240	8.00
5000	11.5	10.44	—	318	6.13

टिप्पणी :—भू-पर्पटी में प्रसरमान यांत्रिक तरंगों को **भूकंपी तरंगें** कहते है। ये अनुतीरी भी हो सकती हैं (संपीडन की तरंगें, वेग v_1) और अनुप्रस्थी भी (अपरूपण की तरंगें, वेग v_2), गहराई H पर घनत्व ρ, दाब p, त्वरण g भी दिए जा रहे हैं।

सारणी 64. **सामान्य दाब पर गैसों में ध्वनि-वेग**

गैस	t, °C	v, m/s	α, m/(s·K)
अमोनिया	0	415	—
अल्कोहल, एथिल	97	269	0.4
अल्कोहल, मेथिल	97	335	0.46
आक्सीजन	0	316	0.56
कार्बन डायक्साइड	0	259	0.4
जलवाष्प	134	494	—
नाइट्रोजन	0	334	0.6
नियोन	0	435	0.8
बेंजोल (वाष्प)	97	202	0.3
हवा	0	331	0.59
हाइड्रोजन	0	1284	2.2
हीलियम	0	965	0.8

टिप्पणी :—1. स्थिर दाब पर तापक्रम बढ़ने से गैसों में ध्वनि-वेग बढ़ता है इसीलिये अन्य तापक्रमों पर वेग ज्ञात करने के लिये वेग-परिवर्तन का तापक्रम-गुणांक दिया गया है (दे. सा. 61)।

2. उच्च आवृत्ति (या न्यून दाब) पर ध्वनि-वेग आवृत्ति से संबधित होता है। प्रदत्त मान ऐसी आवृत्ति व दाब के लिये हैं, जिन पर ध्वनि-वेग व्यावहारिकत: निर्भर नहीं करता।

हवा और नाइट्रोजन में ध्वनि-वेग

चित्र 31. हवा व नाइट्रोजन में ध्वनि-वेग की दाब पर निर्भरता। निर्भरता 20 °C तापक्रम और 200 से 500 kHz तक के आवृत्ति-परास के लिये है।

सारणी 65. **यांत्रिक तरंगों का पैमाना**

आवृत्ति Hz	नाम	उत्पन्न करने की विधियां	उपयोग
0.5-20	अवध्वनि	बड़े जलाशयों में पानी का दोलन, हृदय का स्पंदन	मौसम-भविष्यवाणी, हृद्-रोगों का विश्लेषण
20-2·10^4	श्रव्य ध्वनि	मनुष्य व जीवों के स्वर, वाद्य यंत्र, सीटी, साइरेन, वक्तभाषी (लाउड स्पीकर) आदि	संपर्क, संचार व संकेतन के लिये, दूरी नापने के लिये (स्वनमिति)

(सारणी 65, समापन)

आवृत्ति Hz	नाम	उत्पन्न करने की विधियाँ	उपयोग
$2 \cdot 10^{4}$-10^{10}	पराध्वनि	चुंबकीय विरूपक व दाब-वैद्युत स्रोत, गैल्टन की सीटी; कुछ जीव-जंतु और कीड़े-मकोड़े (चमगादड़, झिंगुर, टिड्डे आदि)	जलगत मापन, पुर्जों की सफाई, पुर्जों व इमारती अवयवों में उपस्थित ऐब का पता लगाना, रसायनिक प्रतिक्रियाओं को त्वरित करना, जीव- व चिकित्सा-विज्ञान में अध्ययन, आण्विक भौतिकी
10^{11} व अधिक	अतिध्वनि	अणुओं का तापीय दोलन कंपन	वैज्ञानिक अनुसंधान-कार्यों में

सारणी 66. **ध्वनि-तीव्रता I और ध्वनि-दाब Δp**

डेसीबेल	I, W/m²	Δp, Pa	उदाहरण
0	10^{-12}	0.00002	आदमी के कान की संवेदना-सीमा।
10	10^{-11}	0.000065	पत्तों की सरसराहट, एक मीटर की दूरी पर धीमी फुसफुसाहट।
20	10^{-10}	0.002	शांत उपवन।
30	10^{-9}	0.00065	शांत कमरा, दर्शक-कक्ष में शोर का सामान्य स्तर। वायोलिन पर पियानोसीमो (अत्यंत धीमा वादन)।
40	10^{-8}	0.002	धीमा संगीत। रहने के कमरे में शोर।
50	10^{-7}	0.0065	निम्न स्तर पर वक्तभाषी। खुली खिड़कियों वाले रेस्तरा या औफिस में शोर।
60	10^{-6}	0.02	तेज रेडियो/दुकान में शोर। 1m की दूरी पर सामान्य स्वर में बात-चीत।
70	10^{-5}	0.0645	ट्रक के मोटर का शोर। ट्राम में शोर।
80	10^{-4}	0.20	चहल-पहल वाली गली। टंकन-विभाग।
90	10^{-3}	0.645	मोटर का हौर्न। बड़ी वाद्य-मंडली द्वारा तेज वादन।
100	10^{-2}	2.0	कील ठोकने वाली मशीन। मोटरगाड़ी में साइरेन
110	10^{-1}	6.45	वातिल (वायु-चालित) हथौड़ा।
120	1	20	5m दूर स्थित जेट-इंजन। जोर का घन-गर्जन।
130	10	64.5	दर्द की दहलीज, ध्वनि सुनायी नहीं देती।

पानी की सतह पर तरंगों का वेग

तरंगों की लंबाई अल्प (2 cm से कम) होने पर मूल भूमिका तलीय तनाव के बलों की होती है; ऐसी तरंगों को **केशिका तरंग** कहते हैं।

चित्र 32. सतही तरंगों का प्रकीर्णन ($h > 0.5\lambda$)।

तरंगों की लंबाई अधिक होने पर मूल भूमिका गुरुत्व-बल अदा करते हैं; ऐसी तरंगों को **भारी (या गुरुत्वी) तरंग** कहते हैं। सतही तरंगों का वेग

श्रव्य संवेदना के लिए ध्वनि-वज्रिता के स्तर

चित्र 33. वज्रिता-स्तर।

तरंग की लंबाई पर निर्भर करता है (चित्र 32; सूत्र 3.27)—यह उस हालत में, जब द्रव की गहराई पर्याप्त अधिक हो ($h > 0.5\ \lambda$) ।

चित्र 33 में समान वज्रिता के तीव्रता-वक्र दिखाये गये हैं । ऊपरी वक्र दर्दानुभूति की दहलीज के अनुरूप है और निचला वक्र—श्रव्यता की दहलीज के । आवृत्ति के मान लघुगणकी पैमाने पर दिये गये है ।

सारणी 67. **भिन्न माध्यमों के विभाजक तल पर लंब रूप से आपतित ध्वनि-तरंगों का परावर्तन-गुणांक (% में)**

द्रव्य	अलुमीनियम	जल	ट्रांसफार्मर का तेल	तांबा	निकेल	पारा	फौलाद	शीशा
अलुमीनियम	0	72	74	18	·24	1	21	2
जल	72	0	0.6	87	89	75	88	65
ट्रान्सफार्मर का तेल	74	0.6	0	88	90	76	89	67
निकेल	24	89	90	0.8	0	19	0.2	34
पारा	1	75	76	13	19	0	16	4
फौलाद	21	88	89	0.3	0.2	16	0	31
शीशा	2	65	67	19	34	4	31	0

टिप्पणी :—(1) **परावर्तन-गुणांक** परावर्तित व आपतित ध्वनि-तरंगों की तीव्रताओं के अनुपात को कहते हैं ।

(2) एक माध्यम से दूसरे में प्रवेश करते वक्त और दूसरे से पहले में आते वक्त ध्वनि के परावर्तन-गुणांक समान होते है ।

(3) यदि परावर्तन किसी पत्तर (प्लेट) से हो रहा है, तो परावर्तन-गुणांक उसकी मुटाई व तरंग-दैर्घ्य के अनुपात पर निर्भर करेगा ।

सारणी 68. **हवा में ध्वनि-अवशोषण का गुणांक** (α. 10^{-4} cm^{-1}); 20 °C पर

आवृत्ति kHz	हवा की सापेक्षिक आर्द्रता, %				
	10	20	40	60	80
1	0.13	0.06	0.03	0.03	0.03
2	0.47	0.23	0.10	0.09	0.08
4	1.27	0.82	0.38	0.24	0.20
6	1.87	1.61	0.84	0.54	0.39
8	2.26	2.48	1.45	0.96	0.69
10	2.53	3.28	2.20	1.47	1.08

टिप्पणी :—ये मान सामान्य दाब के निकटवर्ती मानों के लिये सही है ।

सारणी 69. **द्रव्यों की ध्वनि-अवशोषक क्षमता**

द्रव्य	आवृत्ति, Hz					
	126	250	500	1000	2000	4000
ईंट की दीवार	0.024	0.025	0.032	0.041	0.049	0.07
कपास का कपड़ा	0.3	0.04	0.11	0.17	0.24	0.35
कांच (इकहरा)	0.03	—	0.027	—	0.02	—
कांचर ऊन (9 cm मोटा)	0.32	0.40	0.51	0.60	0.65	0.60
नमदा (25 mm मोटा)	0.18	0.36	0.71	0.79	0.82	0.85
प्लास्तर, चूने का	0.025	0.045	0.06	0.085	0.043	0.058
प्लास्टर, जिप्स का	0.013	0.015	0.020	0.028	0.04	0.05
रोएंदार कंबल	0.09	0.08	0.21	0.27	0.27	0.37
लकड़ी के तख्ते	0.10	0.11	0.11	0.18	0.082	0.11
संगमर्मर	0.01	—	0.01	—	0.015	—

टिप्पणी :—**ध्वनि-अवशोषक क्षमता** ध्वनि की अवशोषित ऊर्जा और परावर्तक सतह पर आपतित ऊर्जा के अनुपात को कहते हैं ।

सारणी 70. **द्रवों में ध्वनि का अवशोषण**

द्रव	t, °C	आवृत्ति का परास, MHz	α/ν^2, 10^{-17} s²/cm
अंडी का तेल	18.5	3	11000
एथिल अल्कोहल	20	7-100	52
एथिल ईथर	25	10	140
एसीटोन	25	4-20	50
किरासीन	25	6-20	110
ग्लीसरीन	26	4-20	1700
टर्पेन्टाइन	25	10	150
नाइट्रोजन	—199	44.5	11
पानी	20	1-200	25
पारा	20	0.5-1000	5.5
पेट्रोलियम	25	10	~100
बेंजोल	20	1-200	850-900
मेथिल अल्कोहल	20	5-46	43

टिप्पणी : — सारणी में दिये गये मान 0.1-2 MPa जैसे दाबों के लिये हैं। इन मानों पर अवशोषण व्यवहारिकतः दाब पर निर्भर नहीं करता।

सारणी 71. **समुद्री पानी में ध्वनि-तरंगों के अवशोषण का गुणांक** (15-20 °C पर)

ν, kHz	20	24	100	200	230	480	940
α, 10^{-4} cm^{-1}	0.023	0.050	0.37	0.69	1.25	2.00	2.90

विद्युत

A. वैद्युत क्षेत्र

मूल अवधारणाएं और नियम

वैद्युत आवेश दो प्रकार के होते हैं—धन और ऋण। **धनावेश** सिल्क के साथ रगड़े गये कांच पर उत्पन्न होता है और **ऋणावेश** रोएंदार चमड़े के साथ रगड़े गये एबोनाइट पर उत्पन्न होता है। समान आवेश एक दूसरे से विकर्षित होते हैं और असामान आवेश परस्पर आकर्षित होते हैं।

परमाणु में **ऋणावेश** के वाहक एलेक्ट्रोन होते है और धनावेश के—प्रोटोन, जो परमाणु के नाभिक में स्थित होते हैं (दे. पृ. 247)। परमाणु में धन व ऋण आवेशों का कुल योग शून्य होता है; आवेश इस प्रकार से वितरित रहते हैं कि परमाणु सामान्यतः उदासीन रहता है।

विद्युतन की प्रक्रिया में पिंडों के बीच धन व **ऋण** आवेशों का वितरण असमान हो जाता है (जैसे घर्षण द्वारा विद्युतन में या गैल्वेनी सेल में, दे. पृ 149); ऐसा असमान वितरण एक ही पिंड के भिन्न भागों के बीच भी संभव है (जैसे वैद्युत प्रेरण में, दे. पृ. 134)।

वैद्युत आवेशों का न तो जन्म होता है, न नाश ही; उनका सिर्फ स्थानांतरण होता है—एक पिंड से दूसरे में, या एक ही पिंड की सीमा में, या अणु के भीतर, परमाणु के भीतर आदि (**वैद्युत आवेशों के संरक्षण का नियम**)।

आवेशों के वाहक भिन्न माध्यमों में भिन्न हो सकते हैं : परमाणु से अलग हो जाने वाले एलेक्ट्रोन (जैसे धातु में); अणु या परमाणु के अंश, जो धन या ऋण आवेश रखते हैं (अर्थात् आयन, जैसे वैद्युत अपघटक में या गैस में); द्रव में उपस्थित आवेशयुक्त कालिलीय कण, जिन्हें मोलायन कहते हैं।

मान के अनुसार कोई भी आवेश एलेक्ट्रोन के आवेश का अपवर्त्य होता है। एलेक्ट्रोन के आवेश का मान निम्नतम है (e); आवेश की इस अल्पतम खुराक को **प्राथमिक आवेश** कहते हैं। प्रोटोन का आवेश परम मान (मापांक) में एलेक्ट्रोन के आवेश के बराबर होता है।

आवेशों की व्यतिक्रिया. वैद्युत क्षेत्र. बिंदु-आवेशों की व्यतिक्रिया का नियम (**कूलम्ब का नियम**) : जड़त्वी मापतंत्र में, जिसके सापेक्ष आवेश स्थिर हैं, परस्पर व्यतिक्रिया का बल

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_{12}^2}\, \mathbf{r}_0,$$

और
$$|\mathbf{F}_{12}| = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_{12}^2} \quad (4.1)$$

होता है, जहाँ $\mathbf{r}_0$ = त्रिज्य सदिश $\mathbf{r}_{12}$ का इकाई सदिश, $\mathbf{F}_{12}$ = आवेश Q_1 के वैद्युत क्षेत्र में उससे दूरी r_{12} पर स्थित आवेश Q_2 पर क्रियाशील बल, $\mathbf{r}_{12}$ = आवेश Q_1 से आवेश Q_2 तक खींचा गया त्रिज्य सदिश, ε_0 = **वैद्युत स्थिरांक (निर्वात की पारवैद्युत वेधिता)**, ε = माध्यम की **आपेक्षिक पारवैद्युत वेधिता**; ε दिखाता है कि निर्वात की तुलना में समसर्वत्र असीम माध्यम बिंदु-आवेशों की व्यतिक्रिया को कितना गुना कम करता है। बल $\mathbf{F}_{21}$ आवेश Q_2 के वैद्युत क्षेत्र में स्थित आवेश Q_1 पर क्रियाशील बल है, जो मान में $|\mathbf{F}_{12}|$ के बराबर होता है। $\mathbf{F}_{12}$ व $\mathbf{F}_{21}$ बलों की दिशाएँ परस्पर विपरीत हैं और उनकी क्रिया-रेखा आवेशों से होकर गुजरती है। गतिमान आवेशों की व्यतिक्रिया के बारे में दे. पृ. 178।

अंतर्राष्ट्रीय इकाई-प्रणाली में वैद्युत स्थिरांक

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9} \frac{\text{फराड}}{\text{मीटर}} = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}},$$

अ. प्र. में आवेश की इकाई **कूलंब** (C) है। 1C ऐसा आवेश है, जिसे 1A की धारा चालक के अनुप्रस्थ काट से 1s में गुजारती है (दे. पृ. 174)।

यदि व्योम में अचल वैद्युत आवेशों पर बलों की क्रिया प्रेक्षित होती है, तो कहते हैं व्योम में **वैद्युत क्षेत्र** उपस्थित है।

विद्युत से आविष्ट पिंड हमेशा वैद्युत क्षेत्र से घिरे रहते हैं। अचल आवेशों के क्षेत्र को **विद्युत्स्थैतिक क्षेत्र** कहते हैं। दिये हुए बिंदु पर वैद्युत क्षेत्र की

तीव्रता सांख्यिक रूप से उस बल के बराबर होती है, जो उस बिंदु पर रखे गये इकाई धनावेश पर क्रिया करता है :

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{Q} \quad \text{और} \quad |\mathbf{E}| = \frac{F}{Q}. \quad (4.2)$$

तीव्रता सदिष्ट राशि है। इसकी दिशा धनावेश पर क्रियाशील बल की दिशा जैसी होती है। दो या अधिक विद्युत-आवेशों के क्षेत्रों की तीव्रताएँ सदिशों की भाँति संयोजित होती हैं (दे. भूमिका)।

बिंदु-आवेश के वैद्युत क्षेत्र की तीव्रता (दिये हुए बिंदु पर) :

$$\mathbf{E}_b = \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2}\, \mathbf{r}_0$$

और

$$|\mathbf{E}_b| = \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2}, \quad (4.3)$$

जहाँ $\mathbf{r}$ = आवेश Q से विचाराधीन बिंदु तक खींचा गया त्रिज्य सदिश, $\mathbf{r}_0$ = इकाई सदिश।

समसर्वत्र आविष्ट अनन्त तल के वैद्युत क्षेत्र की तीव्रता

$$E_t = \frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0}, \quad (4.4)$$

जहाँ σ = आवेश का तलीय घनत्व, अर्थात् तल के इकाई क्षेत्र पर उपस्थित आवेश है।

समसर्वत्र आविष्ट गोले के वैद्युत क्षेत्र की तीव्रता

$$\mathbf{E}_{go} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2}\, \mathbf{r}_0$$

और

$$|\mathbf{E}_{go}| = \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2}, \quad (4.5)$$

जहाँ $\mathbf{r}$ = गोले के केन्द्र से विचाराधीन बिंदु तक खींचा गया त्रिज्य सदिश, $\mathbf{r}_0$ = इकाई सदिश।

लंबे, समसर्वत्र आविष्ट बेलन के वैद्युत क्षेत्र की तीव्रता

$$\mathbf{E}_{be} = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 r}\, \mathbf{r}_0$$

और

$$|\mathbf{E}_{be}| = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 r}, \qquad (4.6)$$

जहाँ τ = आवेश का रैखिक घनत्व, अर्थात् बेलन की इकाई लम्बाई पर स्थित आवेश; $\mathbf{r}$ = बेलन के अक्ष से उसकी लम्ब दिशा में विचाराधीन बिंदु तक खींचा गया त्रिज्य सदिश, r_0 = इकाई सदिश।

सदिष्ट राशि $\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}$ को **वैद्युत स्थानांतरण** कहते हैं (पुराना नाम विद्युत-प्रेरण है)।

रेखा, जिसके प्रत्येक बिन्दु की स्पर्श-रेखा तीव्रता की दिशा बताती है, विद्युत-क्षेत्र की **बल-रेखा** कहलाती है। चित्र 34-36 में भिन्न संरचनाओं वाली बल रेखाएँ दिखायी गयी हैं।

चित्र 34. बिंदु-आवेश के वैद्युत-क्षेत्र की बल-रेखाएं।

(a)

(b)

चित्र 35. बल रेखाएं : (a) विपरीत चिह्न वाले दो बिंदु-आवेशों के क्षेत्र में (b) समान चिह्न वाले दो बिंदु-आवेशों के क्षेत्र में।

चित्र 36. चपटे संधनक का वैद्युत क्षेत्र।

कार्य और वोल्टता. विद्युत-क्षेत्र के बलों द्वारा आवेश के स्थानांतरण की क्रिया में कार्य संपन्न होता है। विद्युस्थैतिक क्षेत्र में कार्य पथ की आकृति पर निर्भर नहीं करता, जिस पर आवेश स्थानांतरित होता है। वैद्युत-क्षेत्र के किसी भी बिन्दु पर स्थित आवेश की अपनी स्थितिज ऊर्जा होती है।

क्षेत्र के दिए हुए बिंदु पर **विभव** उस बिन्दु पर रखे गये इकाई धनावेश की स्थितिज ऊर्जा के बराबर मान वाली अदिष्ट राशि को कहते हैं। विभव शून्य-विभव वाले बिन्दु के चयन पर निर्भर करता है और इसका चयन ऐच्छिक हो सकता है। भौतिकी में अक्सर अनंत दूर स्थित बिन्दु के विभव को शून्य के बराबर मानते हैं। विद्युत-तकनीक में मानते हैं कि पृथ्वी की सतह का विभव शून्य होता है।

विद्युत-क्षेत्र के दो बिन्दुओं के विभव में अन्तर को **वोल्टता** (या **विभवांतर**, U) कहते हैं। सांख्यिक रूप से वोल्टता कार्य के बराबर होती है, जिसे वैद्युत बल इकाई धनावेश को एक बिन्दु से दूसरे तक लाने में सम्पन्न करते हैं।

विद्युस्थैतिक क्षेत्र में आवेश को स्थानांतरित करने में सम्पन्न कार्य है

$$A = QU. \qquad (4.7)$$

अ. प्र. में वोल्टता को **वोल्ट** (V) में व्यक्त करते हैं। 1V दो बिंदुओं के बीच का विभवांतर है, जब 1C धनावेश को एक बिंदु से दूसरे तक लाने में 1J कार्य संपन्न करता है।

जिस सतह पर हर बिन्दु का विभव एक जैसा होता है, उसे **संविभवी तल** कहते हैं। चित्र 34-36 में संविभवी तल डैश-रेखा द्वारा दिखाये गये हैं।

विद्युस्थैतिक क्षेत्र में बल-रेखाएँ संविभवी तलों के साथ लंब होती हैं। संविभवी तल पर आवेश को स्थानांतरित करने में वैद्युत बलों द्वारा संपन्न कार्य शून्य होता है।

यदि A व B—क्षेत्र के दो बिंदु हैं, तो बिंदु A पर क्षेत्र की तीव्रता और दोनों बिंदुओं के बीच का विभवांतर सन्निकट सूत्र

$$E = \frac{\Delta U}{\Delta l}$$

द्वारा जुड़े है। अधिक सही सूत्र है :

$$|\mathbf{E}| = -\lim_{\Delta l \to 0} \frac{\Delta U}{\Delta l} = -\frac{dU}{dl}, \qquad (4.8)$$

जहाँ ΔU=निकटस्थ बिन्दुओं A व B के बीच विभवांतर, Δl=इन बिन्दुओं से गुजरने वाले संविभवी तलों के बीच की दूरी (बल-रेखा पर)। राशि dU/dl को **विभव का नतन** कहते हैं।

यदि विद्युत-क्षेत्र समसर्वत्र (एकरस) है, अर्थात् क्षेत्र के हर बिंदु पर तीव्रता मान व दिशा में स्थिर है (जैसे चपटे धारित्र में), तो $E = -U/l$ होगी, जहाँ l=बल-रेखा के खंड की लम्बाई है।

अ. प्र. में क्षेत्र की तीव्रता वोल्ट प्रति मीटर (V/m) में व्यक्त होती है। 1 V/m ऐसे एकरस क्षेत्र की तीव्रता है, जिसमें बल-रेखा के 1 m लम्बे खण्ड के सिरों का विभवांतर 1V है।

धारिता. जब दो चालकों के बीच स्थित विद्युत-क्षेत्र की सभी बल-रेखाएँ एक चालक से शुरू होती हैं और दूसरे पर समाप्त होती हैं, तब इन चालकों को **धारित्र** कहते हैं और दोनों में से प्रत्येक चालक को **धारित्र का पत्तर** कहते हैं। साधारण धारित्र में पत्तरों पर आवेश की मात्राएँ समान होती है, पर उनके चिह्न विपरीत होते हैं।

धारित्र की **धारिता (विद्युत-धारिता)** किसी एक पत्तर के आवेश और दोनों पत्तरों के विभवांतर का अनुपात है, अर्थात्

$$C = \frac{Q}{U}. \qquad (4.9)$$

विद्युत-धारिता की इकाई फराड (F) है। 1F ऐसे धारित्र की धारिता

है, जिसके प्रत्येक पत्तर पर 1C आवेश होने पर पत्तरों का विभवांतर 1V होता है।

चालक की सतह की आकृति के अनुसार चपटे, बेलनाकार व वर्तुली (गोल) धारित्रों में भेद किया जाता है।

चपटे धारित्र की धारिता

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}, \qquad (4.10)$$

है, जहाँ S=किसी एक पत्तर की सतह का क्षेत्रफल (यदि पत्तर आकार में असमान हैं; तो छोटे वाले का), d=पत्तरों की आपसी दूरी, ε=पत्तरों के बीच स्थित द्रव्य की पारवैद्युत वेधिता।

बेलनाकार धारित्र और समाक्षीय केबिल की धारिता :

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon l}{\ln(b/a)}, \qquad (4.11)$$

जहाँ b=बाह्य बेलन की त्रिज्या, a=आंतरिक बेलन की त्रिज्या, l=धारित्र की लम्बाई।

वर्तुली धारित्र की धारिता :

$$C = \frac{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}{\frac{1}{a} - \frac{1}{b}}, \qquad (4.12)$$

जहाँ a व b आन्तरिक व बाह्य वर्तुलों की त्रिज्याएं।

बिजली की दुतारी लाइन की धारिता :

$$C = \frac{\pi\varepsilon_0\varepsilon l}{\ln\frac{d}{a}}, \qquad (4.13)$$

जहाँ d=समांतर तारों के अक्षों की आपसी दूरी, a = उनकी त्रिज्याएँ, l= लम्बाई।

$C_1, C_2, C_3, \ldots, C_n$ धारिता वाले धारित्रों को समान्तर क्रम में जोड़ने पर कुल धारिता

$$C_{sam} = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots + C_n \qquad (4.14)$$

और शृंखल क्रम में जोड़ने पर

$$\frac{1}{C_{shr}}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}+\ldots+\frac{1}{C_n} \qquad (4.15)$$

आविष्ट धारित्र की ऊर्जा

$$W=\frac{1}{2}CU^2 \qquad (4.16)$$

व्योम में जहां विद्युत-क्षेत्र होता है, वहां ऊर्जा समाहृत रहती है। इकाई आयतन में वितरित ऊर्जा की मात्रा को **ऊर्जा का आयतनी घनत्व** w कहते हैं। तीव्रता E वाले एकरम क्षेत्र में ऊर्जा का आयतनी घनत्व

$$w=\frac{1}{2}\varepsilon_0\varepsilon E^2 \qquad (4.17)$$

है, जहां E=क्षेत्र की तीव्रता है।*

विद्युत-क्षेत्र में चालक व पृथक्कारी. विद्युत-क्षेत्र में रखे गये चालकों में विपरीत चिह्न के आवेश प्रेरित होते हैं। ये आवेश चालक की सतह पर इस प्रकार वितरित होते हैं कि चालक के भीतर विद्युस्थैतिक क्षेत्र की तीव्रता शून्य होती है और चालक की सतह संविभवी तल होती है।

क्षेत्र में रखा गया पृथक्कारी (पारविद्युक) ध्रुवित होता है। **ध्रुवण** का अर्थ है कि अणु में उपस्थित संरचनात्मक आवेश स्थानांतरित होकर मापांक में समान, पर विपरीत चिह्न वाले दो बिंदु-आवेशों के विद्युत-क्षेत्र जैसा एक

चित्र 37. वैद्युत द्विध्रुव।

क्षेत्र बना लेते हैं (दे. चित्र 35a)। विपरीत चिह्न वाले दो बिंदु-आवेश जैसा विद्युत-क्षेत्र रखने वाले आवेशों का व्यूह सामान्यतः **वैद्युत द्विध्रुव** कहलाता है (चित्र 37)।

*किसी मनमाने क्षेत्र के लिए "बिंदु पर ऊर्जा के घनत्व" की अवधारणा प्रयुक्त होती है:

$$w=\lim_{\Delta V\to 0}\frac{\Delta W}{\Delta V}$$

यहां ΔW=सिकुड़ कर बिंदु-रूप धारण करने की प्रवृत्ति वाले आयतन ΔV में संकेंद्रित ऊर्जा। यदि E का अर्थ इसी बिंदु में तीव्रता माना जाये, तो सूत्र (4.17) मनमाने क्षेत्र के लिये भी सही होगा।

द्विध्रुव एक सदिष्ट राशि द्वारा लंछित होता है, जिसे **द्विध्रुव का विद्युताघूर्ण** ($\mathbf{p}_i$) कहते हैं और

$$\mathbf{p}_i=Q\mathbf{l} \qquad (4.18)$$

जहां $\mathbf{l}$=आवेशों के बीच की दूरी है। सदिश $\mathbf{p}_i$ की दिशा द्विध्रुव के ऋणावेश से धनावेश तक खींचे गये त्रिज्य सदिश की दिशा के साथ संपात करती है।

पूरे द्विध्रुव के ध्रुवण का मूल्यांकन सदिष्ट राशि $\mathbf{P}$ की सहायता से किया जाता है, जो इकाई आयतन में उपस्थित सभी विद्युताघूर्णों के सदिष्ट योग के बराबर होता है, अर्थात्

$$\mathbf{P}=\sum_i \mathbf{p}_i/V.$$

इस राशि को **ध्रुवणता** कहते हैं। पारविद्युक की ध्रुवणता $\mathbf{P}$ और विद्युत-क्षेत्र का स्थानांतरण $\mathbf{D}$ निम्न संबंध रखते हैं:

$$\mathbf{D}=\varepsilon_0\mathbf{E}+\mathbf{P} \qquad (4.19)$$

कुछ पारविद्युकों के अणु विद्युत-क्षेत्र की अनुपस्थिति में भी द्विध्रुव होते हैं। ऐसे द्रव्यों के ध्रुवण का कारण आण्विक द्विध्रुवों का क्षेत्र की दिशा में उन्मुख हो जाना है।

सेग्नेटोविद्युक. सेग्नेटोविद्युक शब्द सेग्नेट लवण (Seignete salt) नाम से बना है, जिसमें पहली बार स्वतःस्फूर्त ध्रुवण की संवृति ज्ञात हुई थी।[1] सेग्नेटोविद्युक को विद्युत-क्षेत्र की अनुपस्थिति में भी नन्हें (सूक्ष्म-दर्शीय) व्योमों में बांटा जा सकता है, जो अपना विद्युताघूर्ण रखते हैं। स्वतःस्फूर्त ध्रुवण के इन क्षेत्रों को **प्रांगन** (domain) कहते हैं (दे. आगे भी, पृ. 186)। क्षेत्र की अनुपस्थिति में विद्युताघूर्णों की दिशाएं अस्त-व्यस्त होती हैं और इसीलिए पूरे सेग्नेटोविद्युक का विद्युताघूर्ण शून्य के बराबर होता है। बाह्य विद्युत-क्षेत्र में सेग्नेटोविद्युक कुल मिला कर प्रांगनों के ध्रुवणों

1. सेग्नेट लवण टार्टरिक अम्ल (dihydroxybutanedioic acid): HOOC. CHOH. CHOH. COOH) का एक लवण पोटैशियम-सोडियम टार्टरेट है, जिसे रोशेल लवण (Rochelle salt) भी कहते हैं। स्वतःस्फूर्त ध्रुवण का गुण अन्य लवणों में भी है, जैसे बेरियम टिटानेट में। इन सभी लवणों को फेरोविद्युक या लौह विद्युक कहा जाता है। —अनु.

की दिशाओं में परिवर्तन के कारण ध्रुवित हो जाता है। क्षेत्र का प्रभाव समाप्त हो जाने पर अवशिष्ट ध्रुवण रह जाता है।

सेग्नेटोविद्युकों की पारवैद्युत वेधिता के मान बहुत बड़े होते हैं (कभी-कभी तो कई हजार के क्रम में होते हैं)। यह विद्युत-क्षेत्र की तीव्रता पर निर्भर करता है।

तापक्रम विशेष मान से अधिक होने पर तापीय गति प्रांगनों को नष्ट कर देती है, जिसके कारण सेग्नेटोविद्युक-गुण लुप्त हो जाते हैं। तापक्रम का यह मान **क्यूरी-बिंदु** कहलाता है।

दाब-वैद्युत प्रभाव. यांत्रिक विकृति के कारण कुछ क्रिस्टलों की सतहों पर विशेष दिशाओं में विपरीत चिह्नों के विद्युतावेश इकट्ठे हो जाते हैं और क्रिस्टल के भीतर विद्युत-क्षेत्र उत्पन्न हो जाता है। विकृति की दिशा बदलने पर आवेशों के चिह्न भी बदल जाते हैं। इस संवृति को **दाब-वैद्युत प्रभाव** कहते हैं। दाब-वैद्युत प्रभाव उलट भी सकता है, अर्थात् यदि क्रिस्टल को विद्युत-क्षेत्र में रखा जाये, तो उसकी रैखिक मापें बदल सकती हैं। उलटे दाब-वैद्युत प्रभाव का उपयोग पराध्वनि उत्पन्न करने में होता है।

दाब-वैद्युत प्रभाव में उत्पन्न आवेश निम्न संबंध द्वारा निर्धारित होता है :

$$Q = d_{11}F, \qquad (4.20)$$

जहां F=विकृति उत्पन्न करने वाले बल की मात्रा, d_{11}=दिये हुए क्रिस्टल के लिए स्थिर संगुणक, जिन्हें **दाब-वैद्युत मोडुल** कहते हैं (दे. सारणी 77); d_{11} क्रिस्टलीय जाली के प्रकार, विकृति के प्रकार, और तापक्रम पर निर्भर करता है।

सारणी व ग्राफ

सारणी 72. **पार्थिव वातावरण में वैद्युत क्षेत्र**

ऊंचाई, km	0	0.5	1.5	3	6	12
तीव्रता, V/m	130	50	30	20	10	2.5

टिप्पणी :—1. गरजने वाले बादल पर 10-20 C का आवेश होता है, जो अलग-अलग परिस्थितियों में 300 C तक पहुंचता है।

2. पृथ्वी के आवेश का औसत सतही घनत्व– 1.15 nC/m^2 के बराबर है। पृथ्वी पर $5.7 \cdot 10^5$ C का ऋण आवेश होता है।

सारणी : 73. **विद्युत-पृथक्कारी द्रव्य**

(ε=पारवैद्युत वेधिता, E_{we}=वेधक तीव्रता, ρ'=घनत्व, ρ=विशिष्ट प्रतिरोध)

द्रव्य	ε	E_{we}, MV/m	ρ', Mg/m^3	ρ, Ω·cm
अबरक, फ्लोगोपाइट	4-5.5	60-125	2.5-2.7	10^{13}-10^{17}
,, ,, मुस्कोवीट	4.5-8	50-200	2.8-3.2	—
एबोनाइट (RP)	4-4.5	25	1.3	1×10^{18}
एस्कापोन (P)	2.7-3	36	—	—
अंबर	2.7-2.9	20-30	1.06-1.11	1×10^{18}
ऐस्बेस्टस	—	2	2.3-2.6	2×10^{4}
काँच	4.10	20-30	2.2-4.0	10^{11}-10^{14}
कार्बोलाइट (P)	—	10-14.5	1.2-1.3	—
गुट्टा-पेर्चा	4	15	0.96	2×10^{9}
गेटीनैक्स (परतदार पृथकन) (P)	5-6.5	10-30	1.3	—
चपड़ा (शल्क)	3.5	50	1.02	1×10^{16}
टिकोंड (C)	25-80	15-20	3.8-3.9	—
टेक्स्टोलाइट	7	2-8	1.3-1.4	—
परापोर्सलेन (C)	6.3-7.5	15-30	2.6-2.9	3×10^{14}
पैराफीन	2.2-2.3	20-30	0.4-0.9	3×10^{18}
पोर्सलेन	6.5	20	2.4	—
पोलीविनील क्लोराइड	3.1-3.5	50	1.38	—
पोलीस्टेरीन	2.2-2.8	25-50	1.05-1.65	5×10^{15}-5×10^{17}
प्रेसबोर्ड	3-4	9-12	0.9-1.1	1×10^{9}
प्लेक्सी काँच	3.0-3.6	18.5	1.2	—
फाइबर बोर्ड	2.5-8	2-6	1.1-1.94	5×10^{9}
फ्लोरोप्लास्टिक-3	2.5-2.7	—	—	2×10^{10}
बिटुमेन	2.6-3.3	6-15	1.2	—
बेकेलाइट (फेनिल रेजीन)	4-4.6	10-40	1.2	—
भोज (लकड़ी), सूखी	3-4	40-60	0.7	—
मोम	2.8-2.9	20-35	0.96	2×10^{10}-2×10^{15}
रबर (नर्म)	2.6-3	15-25	1.7-2.0	4×10^{13}

(सारणी 73, समापन)

द्रव्य	ε	E_{we}, MV/m	ρ′, Mg/m^3	ρ, Ω·cm
रेडियो-पोर्सलेन (C)	6.0	15-20	2.5-2.6	—
राजीन	3.5	—	1.1	5×10^{16}
विनील प्लास्टिक (P)	4.1	15	—	—
संगमरमर	8-10	6-10	2.7	1×10^{10}
सिल्क	4-5	—	—	—
सेलुलायड	3-4	30	—	2×10^{10}
स्लेट	6-7	5-14	2.6-2.9	10^8

टिप्पणी :—1. वेधक तीव्रता अधिकतम अनुमत तीव्रता है; इससे अधिक तीव्रता होने पर पारविद्युक अपने विद्युत-पृथक्कारी गुण खो देता है।

2. कोष्ठक में दिये गये वर्ण : P—प्लास्टिक, C—चीनी मिट्टी, RP—रबर प्लास्टिक।

3. पारवैद्युत वेधिता के प्रदत्त मान 10-20°C के लिये हैं। ठोस पदार्थों की पारवैद्युत वेधिता तापक्रम के साथ बहुत कम बदलती है; सिर्फ सेग्नेटो-विद्युक इसके अपवाद है (दे. चित्र 38)।

4. विशिष्ट प्रतिरोध के बारे में देखें पृ. 144।

सारणी 74. शुद्ध द्रवों की पारवैद्युत वेधिता

द्रव्य	तापक्रम, °C						
	0	10	20	25	30	40	50
एथिल अल्कोहल	27.88	26.41	25.00	24.25	23.52	22.16	20 87
एथिल ईथर	4.80	4.58	4.33	4.27	4.15	—	—
एसीटोन	23.3	22.5	21.4	20.9	20.5	19.5	18.7
कार्बन टेट्रा क्लोराइड	—	—	2.24	2.23	—	2.20	2.18
किरासन	—	—	2.0	—	—	—	—
ग्लीसरीन	—	—	56.02	—	—	—	—
पानी	87.83	83.86	80.08	78.25	76.47	73.02	69.73
बेंजोल	—	2.30	2.29	2.27	2.26	2.25	2.22

टिप्पणी :—न्यून मात्रा में अशुद्धियां पारवैद्युत वेधिता के मान को अधिक प्रभावित नहीं करती।

सारणी 75. गैसों की पारवैद्युत वेधिता
(18 °C व सामान्य दाब पर)

द्रव्य	ε	द्रव्य	ε
आक्सीजन	1.00055	हवा	1.00059
कार्बन डायक्साइड	1.00097	हाइड्रोजन	1.00026
जलवाष्प	1.0078	हीलियम	1.00007
नाइट्रोजन	1.00061		

टिप्पणी :—गैसों की पारवैद्युत वेधिता तापक्रम-वृद्धि के साथ घटती है और दाब-वृद्धि के साथ बढ़ती है।

सारणी 76. सेग्नेटोवैद्युत क्रिस्टलों के गुण
(T_C—क्यूरी बिंदु, p_s—स्वतःस्फूर्त ध्रुवण, ε—पारवैद्युत वेधिता)

क्रिस्टल	T_C, K	p_s, nC/m^2	ε
$NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$ सेग्नेट लवण	296 (ऊपरी) 258 (निचला)	2.6	—200
$LiNH_4(C_4H_4O_6) \cdot H_2O$	106	2.1	—
KH_2PO_4	123	52.8	42
KH_2AsO_4	95.6	—	54
$NH_4H_2PO_4$	148	—	56
$BaTiO_3$	391	158	3000
KNbO	708	257	—
$LiNbO_3$	—1470	500	84

टिप्पणी :—1. कुछ सेग्नेटोविद्युकों के गुण विशेष तापक्रम-अंतरालों में ही प्रकट होते है। इन स्थितियों में क्यूरी-तापक्रम के उच्चतम व निम्नतम मान दिये गये है।

2. पारवैद्युत वेधिता के निकटवर्ती मान दिये गये है।

सेग्नेट लवण और बेरियम टिटानेट की पारवैद्युत वेधिता

चित्र 38. रोशेल लवण के अस्थिर पतर की पारवैद्युत वेधिता की तापक्रम पर निर्भरता। दोनों वक्र क्षेत्र की भिन्न तीव्रताओं के लिये है।

चित्र 39. क्षेत्र की तीव्रता पर बेरियम टाइटेनेट और रोशेल लवण की पारवैद्युत वेधिता की निर्भरता (20 °C पर)।

सारणी 77. **क्रिस्टलों के दाब-वैद्युत मोडुल**

क्रिस्टल	d_{ij}, pC/N	क्रिस्टल	d_{ij}, pC/N
अमोनियम फास्फेट	48 (d_{36})	पोटाशियम फास्फेट	21 (d_{36})
कैडमियम सल्फाइड	14 (d_{15})	बेरियम टिटानेट	390 (d_{15})
क्वार्टस	2.31 (d_{11})	रोशेल लवण	345 (d_{14})
छली जस्ता*	3.3 (d_{14})	लीथियम नायोबेट	68 (d_{15})
टूर्मेलाइन	3.8 (d_{15})	लीथियम सल्फेट	18.3 (d_{22})

टिप्पणी :—कुछ क्रिस्टलों के मोडुल विकृति (विरूपण) की दिशा पर निर्भर करते है; इनके लिये मोडुल का महत्तम मान दिया गया है (कोष्ठकों में मोडुल के तदनुरूप प्रतीक दिये गये है)।

* जिक ब्लेंड या प्राकृतिक जिक सल्फाइड, जो सीसे के साधारण अयस्क जैसा दिखता है, पर उसमें सीसा नहीं होता। —अनु.

B. स्थिर विद्युत-धारा

मूल अवधारणाएं और नियम

1. धातुओं में धारा

विद्युत-धारा का बल और विद्युवाहक बल. आवेश-वाहकों की कोई भी सिलसिलेवार गति **विद्यु त-धारा** कहलाती है। धातुओं में ऐसे वाहक एलेक्ट्रान होते हैं। ये ऋणाविष्ट कणिकाएं हैं, जिनका आवेश प्राथमिक आवेश के बराबर होता है। धारा की दिशा औपचारिकत: ऋणावेशों की गति की दिशा के विपरीत मानी जाती है। यदि क्षण t से क्षण $t+\Delta t$ समय में चालक के अनुप्रस्थ-काट में विद्युत की मात्रा ΔQ गुजरती है, तो सीमा

$$I=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta Q}{\Delta t}=\frac{dQ}{dt} \qquad (4.21)$$

क्षण t पर **धारा का बल** कहलाती है।

स्थिर धारा में चालक के अनुप्रस्थ काट से समय के समान अंतरालों में विद्युत की समान मात्रा गुजरती है।

अ. प्र. में धारा-बल की इकाई **ऐंपियर** (A) है। धारा-बल 1 A होने पर चालक के अनुप्रस्थ काट से प्रति सेकेंड 1 C आवेश गुजरता है। ऐंपियर की पूर्ण परिभाषा पृष्ठ 175 पर दी गयी है।

धारा का घनत्व j सदिष्ट राशि को कहते हैं, जिसका मापांक धारा-बल I और चालक के अनुप्रस्थ काट के क्षेत्रफल S का अनुपात है (अनुप्रस्थ काट आवेशों की गति की दिशा के अभिलंब लिया जाता है) :

$$j = I/S. \qquad (4.22)$$

सदिश **j** की दिशा धनावेश-वाहकों के वेग के सदिश की दिशा के साथ संपात करती है।

धारा के घनत्व की इकाई ऐंपियर प्रति वर्ग मीटर (A/m^2) मानी जाती है. 1 A/m^2 धारा का ऐसा घनत्व है, जिसमें वाहकों की गति की दिशा के अभिलंब स्थित अनुप्रस्थ काट के 1 m^2 क्षेत्रफल से होकर धारा 1 A बल से गुजरती है।

धारा का घनत्व :

$$\mathbf{j} = ne\langle \mathbf{v} \rangle, \qquad (4.23)$$

जहां n=इकाई आयतन में आवेश-वाहकों की संख्या, e=एक वाहक का आवेश, $\langle \mathbf{v} \rangle$=वाहकों की क्रमबद्ध (सिलसिलेवार) गति का औसत वेग।

एलेक्ट्रोनों की चंचलता u सांख्यिक तौर पर उनकी क्रमबद्ध गति के औसत वेग के बराबर होती है, जिसे वे इकाई तीव्रता वाले क्षेत्र में प्राप्त करते हैं। (4.23) से निष्कर्ष निकलता है कि,

$$\mathbf{j} = neu\mathbf{E} = \sigma\mathbf{E}, \qquad (4.24)$$

जहां **E**=चालक के भीतर विद्युत-क्षेत्र की तीव्रता, $\sigma = neu$=**विशिष्ट चालकता** (दे. पृ. 144)।

जिन चालकों में धारा स्वतंत्र एलेक्ट्रोनों के स्थानांतरण से बनती है, वे **प्रथम प्रकार के चालक (या एलेक्ट्रोनी चालक)** कहलाते हैं। धातुओं की गणना इन्हीं में होती है। यदि भिन्न-भिन्न चिह्नों व मात्राओं वाले आवेशों के वाहक धारा बना रहे हैं, तो धारा का कुल घनत्व प्रत्येक चिह्न व मात्रा वाले आवेश के वाहकों के लिए कलित घनत्वों के योग के बराबर होगा :

$$\mathbf{j} = \sum_i n_i e_i v_i \qquad (4.25)$$

चालक में धारा प्राप्त करने के लिए उसके सिरों पर विभवांतर बनाये रखना आवश्यक है। विभवांतर बनाये रखने वाला उपकरण **धारा का स्रोत** (या **जनित्र**) कहलाता है। स्रोत के सिरस्थ, जिनके सहारे स्रोत को भक्षी[1] से जोड़ा जाता है, ध्रुव कहलाते हैं। अधिक विभव वाला ध्रुव **धन ध्रुव** कहलाता है और कम विभव वाला **ऋण ध्रुव** कहलाता है। धारा-स्रोतों में ऊर्जा के ऐसे रूप विद्युत-ऊर्जा में रूपांतरित होते हैं, जिनका विद्युत-क्षेत्र से कोई वास्ता नहीं होता। असंवृत धारा-स्रोत के ध्रुवों पर विभवांतर बनाये रखने के लिए ऐसे बलों का उपयोग किया जाता है, जिनकी प्रकृति वैद्युत बलों से भिन्न होती है। ऐसे बलों को पराए (पराया) या **अवैद्युत** (अविद्युचुंबकीय) कहते हैं। स्रोत के भीतर क्रियाशील परार बल आवेशों को वैद्युत बलों की कार्य-दिशा की विपरीत दिशा में वहन करते हैं : वैद्युत बल आवेशों को स्रोत में धन से ऋण ध्रुव की ओर वहन करते हैं और परार बल — ऋण से धन ध्रुव की ओर।

स्रोत का विद्युवाहक बल (**विवाब**, e.m.f.) परार बलों द्वारा इकाई धनावेश को वहन करने में संपन्न कार्य के सांख्यिक मान के बराबर होता है। सांख्यिक रूप से स्रोत का विवाब असंवृत स्रोत के ध्रुवों के विभवांतर के बराबर होता है।

विवाब को वोल्टता की इकाइयों (वोल्ट) में ही नापते हैं।

विवाब विद्युविश्लेषकों में आयनों के विसरण (दे. पृ. 150), विद्युचुंबकीय प्रेरण (दे. पृ. 180) और अर्धचालकीय प्रकाश-वैद्युत बैटरी पर प्रकाश डालने (दे. पृ. 128) आदि से उत्पन्न होता है।

चित्र 40. एक वैद्युत परिपथ का आरेख।

वैद्युत परिपथ में धारा-स्रोत, योजक तार, और ऐसे उपकरण आते हैं, जिनमें धारा कार्य संपन्न करती है (चित्र 40)। परिपथ में कार्य अंततः स्रोत के विवाब द्वारा संपन्न होता है।

ओम का नियम. परिपथ के उस भाग में, जहां कोई परार बल क्रियाशील नहीं होता,

1. विद्युत-भक्षण से चलने वाले उपकरण, जैसे बल्ब आदि। —अनु.

धारा-बल चालक के सिरों की तीव्रता (वोल्टता) का समानुपाती होता है, अर्थात्

$$I=\frac{U}{r} \qquad (4.26)$$

इस संबंध में राशि $1/r$ समानुपातिकता का संगुणक है और इसे **चालकता** कहते हैं। राशि r **वैद्युत प्रतिरोध** कहलाती है।

अ. प्र. में प्रतिरोध की इकाई ओम (Ω) है। $1\ \Omega$ ऐसे चालक का प्रतिरोध है, जिसके सिरों पर तीव्रता 1 V होने पर उसमें 1 A की धारा निश्चित हो जाती है।

स्थिर अनुप्रस्थ काट वाले चालक का प्रतिरोध :

$$r=\rho\frac{l}{S}, \qquad (4.27)$$

जहां ρ=विशिष्ट प्रतिरोध या प्रतिरोधिता (इकाई अनुप्रस्थ काट वाले चालक की इकाई लंबाई में विद्युत-प्रतिरोध), l=चालक की लंबाई, S=अनुप्रस्थ काट का क्षेत्रफल। ρ को ओम-मीटर (Ω·m) में व्यक्त करते हैं। राशि $\sigma=1/\rho$ **विशिष्ट चालकता** कहलाती है। तापक्रम बढ़ाने पर अधिकतर धातुओं का विशिष्ट प्रतिरोध और भी अधिक हो जाता है। प्रतिरोध में इस प्रकार का परिवर्तन सन्निकट रूप से निम्न संबंध द्वारा निरूपित हो सकता है :

$$\rho_t=\rho_0(1+\alpha t), \qquad (4.28)$$

जहां ρ_t=तापक्रम t पर विशिष्ट प्रतिरोध, $\rho_0=0°C$ पर विशिष्ट प्रतिरोध, **α=प्रतिरोध का तापक्रमी गुणांक** (जो चालक को 1°C अधिक गर्म करने पर प्रतिरोध में होने वाले परिवर्तन में आरंभिक प्रतिरोध से भाग देने पर प्राप्त सांख्यिक मान के बराबर होता है)। विशेष कम तापक्रमों पर कुछ चालकों का विशिष्ट प्रतिरोध छलांगें मारता हुआ घटने लगता है और शून्य के बराबर हो जाता है। इस संवृत्ति को **अतिचालकता** कहते हैं।

प्रतिरोधों को शृंखल क्रम में जोड़ने पर कुल प्रतिरोध

$$R_{shr}=R_1+R_2+R_3+\ldots+R_n \qquad (4.29)$$

होता है और समांतर क्रम में जोड़ने पर

$$\frac{1}{R_{sam}}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}+\ldots+\frac{1}{R_n} \qquad (4.30)$$

होता है।

परिपथ के जिस भाग में विवाब क्रियाशील होता है, उसके लिए ओम के नियम का रूप है

$$I=\frac{U+\mathscr{E}}{R}, \qquad (4.31)$$

जहां R=विचाराधीन भाग का प्रतिरोध, U=इस भाग की तीव्रता (वोल्टता), $\mathscr{E}$=विद्युवाहक बल, I=धारा-बल। ध्यान दें कि इस सूत्र में U व $\mathscr{E}$ का चिह्न धन या ऋण में से कोई भी हो सकता है। विवाब धनात्मक माना जाता है, जब वह विभव को धारा की दिशा में बढ़ाता है (धारा स्रोत के ऋण से धन की ओर बहती है); तीव्रता (वोल्टता) को धनात्मक तब मानते हैं, जब स्रोत के भीतर धारा विभव-ह्रास की दिशा में बहती है (धन से ऋण की ओर)। उदाहरणार्थ, संचायक को आविष्ट करते वक्त (चित्र 41) आवेशक धारा

चित्र 41. संचायक का आवेशन।

$$I_a=\frac{U-\mathscr{E}_{san}}{R_{san}} \qquad (4.32)$$

होगी, जहां U=आविष्ट करते वक्त स्रोत के सिरस्थों पर तीव्रता, $\mathscr{E}_{san}$=संचायक का विवाब, R_{san}=संचायक का प्रतिरोध (योजक तारों का प्रतिरोध उपेक्षित है)। इसी स्थिति में भाग ADB के लिए

$$i_a=\frac{\mathscr{E}_s-U}{R_{an}}, \qquad (4.33)$$

जहां $\mathscr{E}_s$=स्रोत का विवाब, R_{an}= स्रोत का आंतरिक प्रतिरोध।

संवृत अविशाखित परिपथ में (इस स्थिति में $U=0$) संबंध (4.33) को निम्न रूप में लिखा जाता है :

$$i=\frac{\mathscr{E}}{R+R_{an}}, \qquad (4.34)$$

जहां R=परिपथ का बाह्य प्रतिरोध है।

विद्युत-धारा का कार्य. परिपथ के किसी खंड में स्थिर धारा द्वारा संपन्न कार्य :

$$A = IUt, \qquad (4.35)$$

जहां t = धारा बहने का समय, U = विचाराधीन खंड पर तीव्रता, I = धारा-बल ।

यदि खंड पर विवाब अनुपस्थित है, तो चालक की आंतरिक ऊर्जा में परिवर्तन (ताप-विसर्जन) से संबंधित कार्य, जिसे धारा संपन्न करती है,

$$A = \frac{U^2}{R} t. \qquad (4.36)$$

आंतरिक ऊर्जा में परिवर्तन से संबंधित कार्य (खंड पर विवाब उपस्थित हो या अनुपस्थित, दोनों ही हालतों में) :

$$A = I^2 Rt. \qquad (4.37)$$

अ. प्र. में कार्य (और ऊर्जा की भी) इकाई जूल (J) है; 1 V तीव्रता वाले खंड में 1 A की स्थिर धारा द्वारा 1 s में संपन्न कार्य को 1 J मानते हैं ।

किर्खहोफ के नियम. विशाखित परिपथ के लिए धारा, तीव्रता व विवाब का कलन किर्खहोफ के नियमों के आधार पर होता है ।

चित्र 42. धाराओं का संगम (जंकशन) ।

प्रथम नियम : *किसी विशाखन-बिंदु पर संसृत परिपथ-खंडों में धारा-बलों का बीजगणितीय योग शून्य के बराबर होता है ।* उदाहरणार्थ (चित्र 42 में) :

$$I_1 + I_2 + I_3 - I_4 = 0. \qquad (4.38)$$

दूसरा नियम : *विशाखित परिपथ के किसी संवृत आकृति में धारा-बलों व उनके तदनुरूप प्रतिरोधों के गुणनफलों का बीजगणितीय योग आकृति के सभी विवाब के बीजगणितीय योग के बराबर होता है ।*

उपरोक्त योग ज्ञात करते वक्त उन धाराओं को धनात्मक मानना चाहिए, जिनकी दिशाएँ आकृति का चक्कर लगाने के लिए औपचारिकतः चुनी गयी दिशा के साथ संपात करती है । धनात्मक उन विवाब को मानते हैं, जो

चित्र 43. बहुशाखी परिपथ से अलग की गयी एक आकृति ।

विभव को आकृति का चक्कर लगाने की दिशा में ऊँचा करते हैं (अर्थात् चक्कर लगाने की दिशा स्रोत के धन ध्रुव से ऋण ध्रुव की दिशा के साथ सपात करती है) । उदाहरण के लिये (चित्र 43 में) :

$$I_1R_1 + I_2R_2 - I_3R_3 = \mathscr{E}_1 + \mathscr{E}_2 - \mathscr{E}_3. \qquad (4.39)$$

समान स्रोतों को शृंखल क्रम में जोड़ने पर

$$I(nR_1 + R) = n\mathscr{E} \qquad (4.40)$$

जहां n = स्रोतों की संख्या, R_1 = किसी एक स्रोत का आंतरिक प्रतिरोध, R = बाह्य प्रतिरोध, $\mathscr{E}$ = एक स्रोत का विवाब ।

समान तरह के n स्रोतों को समांतर क्रम में जोड़ने पर

$$I\left(R + \frac{R_1}{n}\right) = \mathscr{E}. \qquad (4.41)$$

2. विद्युविश्लेषकों में धारा

विद्युविश्लेषक चालक (या सिर्फ **विद्युविश्लेषक**) जल (या अन्य घोलकों) में अम्लों, भस्मों व लवणों के घोलों को कहते हैं । पिघले हुए लवणों में भी विद्युत-चालन का गुण होता है । विद्युविश्लेषकों में आवेशों का

वहन आयन करते हैं। **आयन** धनाविष्ट या ऋणाविष्ट अणु-खंडों (परमाणुओं, मूलों या स्वयं अणुओं) को कहते हैं।

विद्युविश्लेषक में वैद्युत क्षेत्र उसमें डूबे हुए धारा-वाही पत्तरों के बीच उत्पन्न होता है; इन पत्तरों को **विद्युद** (एलेक्ट्रोड) कहते हैं। विद्युद विवाब-स्रोत के ध्रुवों से जुड़े होते हैं। धन ध्रुव से जुड़ा हुआ विद्युद **ऊँचद** (ऐनोड) कहलाता है और ऋण ध्रुव से जुड़ा हुआ — **नीचद** (कैथोड)। विद्युत-क्षेत्र में नीचद की ओर स्थानांतरित होने वाले धनात्मक आयन **नीचायन** (कैटायन) कहलाते हैं; उच्चद की ओर स्थानांतरित होने वाले ऋणात्मक आयन **ऊँचायन** (ऐनायन) कहलाते हैं।

दोनों चिह्नों वाले आयनों से उत्पन्न धारा का घनत्व :

$$j = n_+ q_+ \langle v_+ \rangle + n_- q_- \langle v_- \rangle, \qquad (4.42)$$

जहां n_+, $\langle v_+ \rangle$—नीचायनों की सांद्रता, और उनकी क्रमबद्ध गति का औसत वेग; q_+=एक नीचायन का आवेश; n_-, $\langle v_- \rangle$—ऊँचायनों की सांद्रता, और उनकी क्रमबद्ध गति का औसत वेग; q_-=एक ऊँचायन का आवेश।

आयनों की चंचलता सांख्यिक रूप से क्रमबद्ध गति के औसत वेग के बराबर होती है, जिसे आयन इकाई तीव्रता वाले क्षेत्र में प्राप्त करता है : $u_+ = \langle v_+ \rangle / E$ व $u_- = \langle v_- \rangle / E$

आयनों की चंचलता u_+ व u_- द्वारा धारा के घनत्व को व्यक्त करने पर

$$j = (n_+ u_+ q_+ + n_- u_- q_-)\, E, \qquad (4.43)$$

जहां E=विद्युत-क्षेत्र की तीव्रता। ओम का नियम विद्युविश्लेषकों के लिए भी सत्य है।

विद्युविश्लेषकों (या पिघले हुए लवणों) से होकर धारा के गुजरने पर उनकी रसायनिक संरचना बदल जाती है और विभिन्न उत्पाद अलग हो कर विद्युदों पर जमा हो जाते हैं। इसी संवृति को **विद्यु विश्लेषण** कहते हैं।

फैराडे का प्रथम नियम. *विद्युविश्लेषण में विद्युद पर पृथक्कृत पदार्थ का द्रव्यमान विद्युविश्लेषक से गुजरने वाले विद्युत की मात्रा Q का समानुपाती होता है :*

$$m = kQ. \qquad (4.44)$$

समानुपातिकता का संगुणक k सांख्यिक रूप से इकाई मात्रा विद्युत के गुजरने

पर पृथक होने वाले पदार्थ के द्रव्यमान के बराबर होता है। इस संगुणक को दिये हुए पदार्थ का **विद्यु रसायनिक तुल्यांक** कहते है।

फैराडे का दूसरा नियम. *दिये हुए पदार्थ का विद्युरसायनिक तुल्यांक उसके रसायनिक तुल्यांक μ/n का समानुपाती होता है :*

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{\mu}{n}; \qquad (4.45)$$

रसायनिक तुल्यांक द्रव्यमान की एक गैरप्रणालिक इकाई है, जो दिये हुए पदार्थ के मोलीय द्रव्यमान μ और उसकी संयुज्यता n के अनुपात के बराबर होती है। स्थिरांक F को **फैराडे-संख्या** (या **फैराडे-स्थिरांक**) कहते हैं; F=96 500 C/mole। जब किन्हीं भी दो विद्युदों से फैराडे की संख्या के बराबर आवेश गुजरता है, तब प्रत्येक विद्युद पर पदार्थ का μ/n द्रव्यमान पृथक होता है।

गैल्वेनीक सेल. विद्युविश्लेषक में डूबे हुए विद्युद और घोल के बीच कोई विभवांतर स्थापित हो जाता है, जिसे दिये हुए घोल में दिये हुए विद्युद का **विद्युरसायनिक विभव** कहते हैं।

आयनों की मानक सांद्रता वाले घोलों में धातुओं के विद्युरसायनिक विभव के मानों को **मानक विभव** कहते हैं। ऐसी सांद्रता होने पर विद्यु-रसायनिक विभव सिर्फ धातुओं के प्रकार पर निर्भर करता है। मानक विभव हाइड्रोजन-विद्युद के सापेक्ष निर्धारित किया जाता है। हाइड्रोजन-विद्युद प्लैटिनम का हाइड्रोजन से संतृप्त पत्तर होता है, जो आयनों की 2 mol/lit सांद्रता वाले गंधकाम्ल के जलीय घोल में आंशिक तौर पर डूबा रहता है।

विद्युविश्लेषक में दो विद्युदों को डुबाने पर उनके बीच विभवांतर स्थापित होता है, जो विद्युदों के मानक विद्युरसायनिक विभवों के अंतर के बराबर होता है। ऐसा विद्युविश्लेषक, जिसमें दो भिन्न प्रकार के विद्युद डूबे होते हैं, **गैल्वेनिक सेल** कहलाता है (जैसे वोल्ट की बैटरी, जो गंधकाम्ल के जलीय घोल में तांबे और जस्ते के पत्तरों को डुबाने से बनती है)।

संचायक भी गैल्वेनिक सेल ही होते हैं, जिसके विद्युद ऐसे धातुओं से बनाये जाते हैं, जो अपने आरंभिक गुण पुनः प्राप्त कर लेते है; इसके लिए सेल में उसे काम लाते वक्त उसमें बहने वाली धारा की विपरीत दिशा में विद्युत-धारा प्रवाहित करनी पड़ती है। सेल को काम लाते वक्त उसमें बहने वाली धारा निरावेशक धारा कहलाती है और उसकी विपरीत दिशा में

बहाई जाने वाली धारा **आवेशक धारा** कहलाती है। दी हुई परिस्थितियों (तापक्रम, निरावेशन धारा, आरंभिक वोल्टता) में संचायक से विद्युत की जितनी मात्रा प्राप्त हो सकती है, उसे संचायक की धारिता कहते हैं और उसे कूलंब में व्यक्त करते हैं।

3. गैसों में विद्युत-धारा

गैसों में विद्युत-धारा बनने का कारण उनमें उपस्थित आयन और मुक्त एलेक्ट्रोन होते हैं। गैसों का आयनन (आयनीकरण) ऐसी प्रक्रिया है, जिसमें एलेक्ट्रोन उदासीन (आवेशहीन) अणुओं से अलग हो जाते हैं और उनका एक भाग अन्य उदासीन अणुओं व परमाणुओं के साथ संयुक्त हो जाता है। अणु या परमाणु से एलेक्ट्रोन के अलग होने में संपन्न कार्य **आयनन-कार्य** कहलाता है (इसे **आयनन का विभव** भी कहते हैं)।

आयनन-कार्य को **एलेक्ट्रोन-वोल्ट** (eV) में नापने की प्रथा है; 1 eV ऊर्जा की वह मात्रा है, जिसे एलेक्ट्रोन 1 V विभवांतर वाले क्षेत्र से गुजरने में प्राप्त करता है।

धातुओं व द्रवों की तरह गैसों में भी धारा का घनत्व आवेशवाही आयनों की सांद्रता, उनकी चंचलता और उनके आवेशों की मात्रा द्वारा निर्धारित किया जाता है। पर चूंकि गैस में आयनों की सांद्रता क्षेत्र की तीव्रता पर निर्भर करती है और आयनों का वितरण गैस द्वारा छेंके गये व्योम में असमान रहता है, इसलिए गैसीय विद्युचालक अधिकांशतः ओम के नियम का पालन नहीं करते।

गैसों में दो प्रकार की चालकता होती है : अस्वपोषित और स्वपोषित। **अस्वपोषित चालकता** तब प्राप्त होती है, जब गैस में आयन प्रयुक्त विद्युत-क्षेत्र के प्रभाव से नहीं, बल्कि अन्य कारणों (जैसे एक्स-किरणों या ताप) के प्रभाव से बनते हैं। जब आयन विद्युदों के बीच प्रयुक्त विद्युत-क्षेत्र के प्रभाव से ही बनने लगते हैं, तब **स्वपोषित चालकता** का उदाहरण मिलता है।

निर्वात में (जैसे एलेक्ट्रोनी बल्बों में) धारा का कारण एलेक्ट्रोनों की गति है, जो निर्वात में रखे गये विद्युदों से उड़-उड़ कर निकलते रहते हैं। धातु में से मुक्त एलेक्ट्रोन को अलग करने के लिए नियत कार्य करना पड़ता है। इस कार्य को **निकासी कार्य** कहते हैं।

तापीय गति के प्रभाव-वश धातु में से एलेक्ट्रोन के **निकास को तापीय एलेक्ट्रोनी उत्सर्जन (या तापायनी उत्सर्जन)** कहते हैं. धातु में से एलेक्ट्रोन निकल जाये, इसके लिए आवश्यक है :

$$\frac{1}{2} m_e v^2_n \geqslant A, \qquad (4.46)$$

जहां m_e=एलेक्ट्रोन का द्रव्यमान, v_n=एलेक्ट्रोन के तापीय वेग का सतह की अभिलंब दिशा में प्रक्षेप, A=निकासी कार्य।

तापायनी उत्सर्जन के महत्तम मान को (स्थिर तापक्रम पर) **संतृप्ति-धारा** कहते हैं। तापायनी उत्सर्जन में संतृप्ति-धारा का घनत्व निम्न सूत्र द्वारा निर्धारित होता है :

$$j = BT^2 e^{-A/(kT)} \qquad (4.47)$$

जहां B=स्थिरांक, T=परम तापक्रम, k=बोल्ट्समान का स्थिरांक (दे. पृ. 74), $e \approx 2.72$—नैसर्गिक लघुगणकों का आधार। राशियां B व A को अक्सर **उत्सर्जन-स्थिरांकों** के नाम से पुकारा जाता है। सभी शुद्ध धातुओं के लिए राशि B का मान सिद्धांत की दृष्टि से समान होना चाहिए [60.2 A/cm²·K²)], पर प्रयोग में भिन्न मान प्राप्त होते है।

आक्साइड-कैथोडों का व्यापक उपयोग हो रहा है। ये धातु के बने आधार पर बेरियम (या कुछ अन्य विशेष धातुओं में से किसी एक) के आक्साइड का स्तर चढ़ा देने से प्राप्त होते हैं; इस प्रक्रिया से निकासी कार्य काफी कम हो जाता है।

गैस में स्थित ठंडे विद्युदों के बीच बड़ी तीव्रता (वोल्टता) वाला क्षेत्र प्रयुक्त करने पर निरावेशन चिनगारी के रूप में संपन्न होता है (तड़क)। तड़क के लिए आवश्यक वोल्टता **(तड़क-वोल्टता)** विद्युदों के पदार्थ, रूप व आकार (मापों) पर निर्भर करती है, उनकी आपसी दूरी और गैस की प्रकृति व उसके दाब पर भी।

यदि विद्युद चपटे व समानांतर हैं और उनके आकार उनकी आपसी दूरी के साथ तुलनीय हैं, तो दी हुई गैस व विद्युद-पदार्थों के लिए तड़क देने वाली वोल्टता सिर्फ गुणनफल pd पर निर्भर करती है (जहां p=गैस का दाब, d=विद्युदों की आपसी दूरी)। यदि p व d इस प्रकार बदलते हैं कि उनका गुणनफल स्थिर रहता है, तो तड़की वोल्टता भी स्थिर रहती है।

किसी विशेष वोल्टता पर तड़क देने वाली एलेक्ट्रोडों की आपसी दूरी को **स्फुलिंगाकाश** कहते हैं। स्फुलिंगाकाश के आधार पर विद्युदों के बीच वोल्टता का मान निर्धारित किया जा सकता है।

4. अर्धचालक

अर्धचालक ऐसे पदार्थों को कहते हैं, जिनमें विद्युचालकता एलेक्ट्रोनों की गति के कारण होती है और विशिष्ट प्रतिरोध कमरे के तापक्रम पर 10^{-2}—$10^{9}\Omega\cdot$cm के अंतराल में होता है। तापक्रम में परिवर्तन होने पर अर्धचालकों का विशिष्ट प्रतिरोध बहुत तेजी से बदलता है। धातुओं की तरह अर्धचालकों का प्रतिरोध तापक्रम ऊँचा होने पर बढ़ता नहीं, बल्कि घटता है। वह अर्धचालकों में उपस्थित अशुद्धियों पर भी बहुत निर्भर करता है।

परमाणु में स्थित एलेक्ट्रोन विविक्त (अलग-अलग) ऊर्जा-स्तरों (दे. पृ. 248) पर होते हैं; हर एलेक्ट्रोन ऊर्जा का एक निश्चित मान लिए होता है, जो दूसरे एलेक्ट्रोनों की ऊर्जा से भिन्न होता है। पृथक्कृत परमाणु में दो से अधिक एलेक्ट्रोन समान ऊर्जा-स्तर पर नहीं रह सकते; पर वे भी स्पिन की दिशा (दे. पृ. 249) के अनुसार एक-दूसरे से भिन्न होंगे।

किसी पदार्थ के पृथक्कृत परमाणुओं में परस्पर अनुरूप ऊर्जा-स्तर समान होंगे। व्यतिक्रिया (पारस्परिक क्रिया) के कारण हर परमाणु के ऊर्जा-स्तर थोड़ा-सा बदल जाया करते हैं (यदि उनकी तुलना पृथक्कृत परमाणुओं के ऊर्जा-स्तरों से की जाये)। व्यतिकारी परमाणुओं के ऊर्जा-स्तर परस्पर भिन्न होंगे।

चित्र 44. अर्धचालकों में ऊर्जा-स्तर।

उदाहरण के लिए चित्र 44a में पृथक्कृत (व्यतिक्रिया में भाग नहीं लेने वाले) परमाणुओं की ऊर्जा के K व L स्तर दिखाये गये हैं; n परमाणुओं

की व्यतिक्रिया की अवस्था में प्रत्येक स्तर n भिन्न स्तरों में "विघटित" हो जाता है (चित्र 44b)। "विघटित स्तरों" की ऊर्जा में करीब 10^{-22}—10^{-23} eV का अंतर होता है। ऊर्जा के विघटित स्तर मिल-जुल कर ऊर्जा-स्तर की एक **अनुमत पट्टी** बनाते हैं। ये पट्टियाँ ऊर्जा के वर्जित मानों के अंतरालों द्वारा पृथक्कृत हैं। ऐसे अंतरालों को **वर्जित पट्टियों** का नाम दिया गया है। एलेक्ट्रोन ऐसा कोई ऊर्जा-स्तर नहीं रख सकता, जो वर्जित पट्टियों में आता है।

धातुओं के समान ही, अर्धचालकों की विद्युचालकता का कारण सिर्फ संयोजी एलेक्ट्रोन होते हैं, क्योंकि आंतरिक अभ्रों के एलेक्ट्रोन नाभिक के साथ मजबूती से जुड़े रहते हैं। 0 K पर संयोजी एलेक्ट्रोन निम्नतम ऊर्जा रखते हैं। इस पट्टी का कोई भी अनुमत स्तर खाली नहीं होता और इसे **पूरित** (या **संयुज्यता-**) **पट्टी** कहते हैं। 0 K पर अनुमत ऊर्जा-स्तरों की दूसरी पट्टी में एक भी एलेक्ट्रोन नहीं होता; इसे **चाल्यता-पट्टी** कहते हैं। पूरित पट्टी व चाल्यता-पट्टी एक-दूसरे से वर्जित पट्टी द्वारा पृथक होती हैं (चित्र 44b)। पूरित पट्टी से चाल्यता पट्टी में एलेक्ट्रोन के आने के लिए आवश्यक ऊर्जा की मात्रा ΔE_0 को **वर्जित पट्टी की चौड़ाई** कहते हैं। धातुओं में पूरित व चाल्यता-पट्टियाँ एक-दूसरी को अंशतः ढके होती हैं; पारविद्युकों में $\Delta E_0 > 2$eV।

विद्युचालकता का कारण चाल्यता पट्टी में एलेक्ट्रोनों की उपस्थिति है; यदि चाल्यता-पट्टी में एलेक्ट्रोन नहीं हैं, तो विद्युचालकता भी नहीं होगी।

तापीय-गति (अन्य कामों के अतिरिक्त) एलेक्ट्रोनों का चाल्यता-पट्टी में संक्रमण उपलब्ध कराती है। चाल्यता-पट्टी में एलेक्ट्रोनों की संख्या निम्न सूत्र द्वारा निर्धारित होती है :

$$n = Ae^{-\Delta E_0/2kT} \qquad (4.48)$$

जहां A=स्थिरांक, k=बोल्ट्समान का स्थिरांक, T=परम तापक्रम।

विशिष्ट विद्युचालकता

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\Delta E_0/(kT)} \qquad (4.49)$$

चाल्यता-पट्टी में एलेक्ट्रोनों के संक्रमण के बाद संयुज्यता-पट्टी में रिक्त स्तर रह जाते हैं। बाह्य विद्युत-क्षेत्र की उपस्थिति में एलेक्ट्रोन दोनों ही पट्टियों में स्थानांतरित होते रहेंगे। चाल्यता-पट्टी में एलेक्ट्रोनों के स्थानांतरण से उत्पन्न चालकता **एलेक्ट्रोनी चालकता** या **n-रूपी चालकता** कहलाती है (n वर्ण शब्द negative से लिया गया है); संयुज्यता-पट्टी में एलेक्ट्रोनों के

स्थानांतरण से उत्पन्न चालकता **छिद्रिल चालकता** या **p-रूपी चालकता** कहलाती है (p शब्द positive का प्रथम वर्ण है)। पूरित पट्टी में एलेक्ट्रोन के स्थानांतरण को एलेक्ट्रोन की गति की विपरीत दिशा में धनावेश का स्थानांतरण माना जा सकता है। ऐसे धनावेश को औपचारिकतः **छिद्र** कहते हैं। समान संख्या में एलेक्ट्रोनों व छिद्रों (जो एलेक्ट्रोनों के संयुज्यता-पट्टी से चाल्यता-पट्टी में संक्रमण से बनते हैं) की गति से उत्पन्न चालकता को **निजी** (या **आंतरिक**) चालकता कहते हैं। निजी चालकता संयुज्यता-बंधों में विघ्न के कारण उत्पन्न होती है।

एलेक्ट्रोनी चालकता वाले अर्धचालक को **n-रूपी अर्धचालक** कहते हैं और छिद्रिल चालकता वाले **को—p-रूपी अर्धचालक**।

अर्धचालकों के व्यावहारिक उपयोग में **अशुद्धिजनित चालकता** को अधिकतम महत्त्व दिया जाता है; यह अर्धचालकों में उपस्थित अशुद्धियों के कारण उत्पन्न होती है। अशुद्धियां दो प्रकार की होती हैं—दाता और ग्राही। **दाता अशुद्धियां** ऊर्जा के अतिरिक्त अनुमत स्तरों को भी वर्जित पट्टी की ऊपरी सीमा के पास जन्म देती है। ऐसी अशुद्धियों के परमाणु एलेक्ट्रोनों को चाल्यता-पट्टी में पहुँचा देते हैं; अशुद्धिजनित एलेक्ट्रोनी चालकता इसी के कारण उत्पन्न होती है। **ग्राही अशुद्धियां** अतिरिक्त स्तरों को वर्जित पट्टी की निचली सीमा के पास जन्म देती हैं; इनके परमाणु एलेक्ट्रोनों को संयुज्यता-पट्टी से अपने स्तर पर ग्रहण कर लेते हैं, जिसके फलस्वरूप अशुद्धिजनित छिद्रिल चालकता उत्पन्न होती है।

जर्मेनियम में उपस्थित आवर्त प्रणाली के V-ग्रुप के तत्त्व (जैसे एंटीमनी) दाता अशुद्धियों के उदाहरण हैं और III-ग्रुप के तत्त्व (जैसे गैलियम) ग्राही अशुद्धियों के उदाहरण हैं। ऐसी अशुद्धिजनित चालकता भी संभव है, जब अर्धचालक में दाता और ग्राही, दोनों ही प्रकार की अशुद्धियां मिली रहती हैं। ध्यान देने योग्य बात है कि एलेक्ट्रोन और छिद्र, दोनों ही, हर प्रकार के अर्धचालक में हमेशा ही उपस्थित रहते हैं, पर उनकी असमान सांद्रता या चंचलता के कारण विद्युचालकता में उनका योगदान असमान रह सकता है।

5. ताप-विद्युत

यदि दो असमान चालकों में बने संवृत परिपथ में चालकों के संधि-स्थलों को भिन्न तापक्रमों पर रखा जाये, तो ऐसे परिपथ में धारा बहने लगेगी।

धारा का पोषण संधि-स्थलों पर उत्पन्न विवाब द्वारा होता है। इन परिस्थितियों में उत्पन्न विवाब को **तापीय विद्युवाहक बल (ता. विवाब)** कहते हैं और इस संवृति को **ताप-विद्युत** (या तापीय विद्युत) कहते हैं।

तापक्रम के कुछ अंतरालों में ता. विवाब तापक्रमों में अंतर का समानुपाती होता है। इस स्थिति में ता. विवाब $\mathscr{E}_1 = \alpha(T_1 - T_2)$ होता है। राशि α को **अंतराश्रयी ता. विवाब** (या **ता. विवाब का संगुणक**) कहते हैं; सांख्यिक रूप से यह तापक्रमों में 1 °C के अंतर से उत्पन्न ता. विवाब के बराबर होती है।

सारणी और ग्राफ

पार्थिव वातावरण में वैद्युत धारा

पार्थिव वैद्युत क्षेत्र (दे. सारणी 72) के प्रभाव से वातावरण में आयनों की धारा, अर्थात् चालकता-धारा उत्पन्न हो जाती है, जिसकी दिशा लंबवत नीचे की ओर होती है। इस धारा का घनत्व ऊँचाई के अनुसार नहीं बदलता, और "साफ" मौसम वाले क्षेत्र में $2-3 \times 10^{-16}$ A/cm² के बराबर होता है। विपरीत दिशा वाली धाराएं तड़ित-सक्रिय क्षेत्रों में उत्पन्न होती हैं।

जलमंडल (hydrosphere) में धारा का घनत्व 1 μA/cm² होता है।

वर्षा की बूंदों और आकाश से गिरने वाले ओले और बर्फ के फाहों पर उपस्थित आवेशों की गति से उत्पन्न धारा का घनत्व: शांत वर्षा में $10^{-11}-10^{-10}$ A/cm², ओले पड़ने व बिजली के साथ वर्षा होने पर 10^{-8} A/cm² तक।

तड़ित (आकाशी) विद्युत में धारा का बल 0.5 MA तक होता है, पर अधिकांश स्थितियों में 20 से 40 KA तक होता है।

तड़ित विद्युत की तीव्रता (वोल्टता) 10^9 V तक पहुँच जाती है। तड़ित का जीवन-काल करीब 1ms है, उसकी लंबाई लगभग 10 km होती है और उसके मार्ग की मुटाई 20 cm तक होती है।

वातावरण में एलोक्ट्रोनों की सांद्रता

चित्र 45. वातावरण में ऊंचाई के साथ-साथ एलेक्ट्रोनों की सांद्रता में परिवर्तन (कृत्रिम उपग्रहों व राकेटों से ली गयी नापों पर आधारित) डैश-रेखा अनुमित मान दिखाती है।

सारणी 78. धातुओं का विशिष्ट प्रतिरोध और प्रतिरोध का तापक्रमी गुणांक (20 °C पर)

धातु	ρ, 10^{-6} Ω·cm	α, 10^{-3} K^{-1}
अलमीनियम	2.8	4.9
कांसा (फास्फर-युक्त)	8.0	4.0
कामियम	2.7	—
चांदी	1.6	3.6
जस्ता	5.9	3.5
टिन	11.5	4.2
टंगस्टन	5.5	4.5
टैंटेलम	15.5	3.1
निकेल	10.0	5.0
तांबा	1.75	3.9
पारा	95.8	0.9
पीतल	2.5-6.0	2.7
मॉलिब्डेनम	5.7	3.3
लोहा	9.8	6.2
सीसा	22.1	4.1

टिप्पणी :—सारणी में राशियों के औसत मान दिये गये है। वास्तविक मान नमूने की शुद्धता, उसके तापोपचार आदि पर निर्भर करते है।

शुद्ध धातुओं के प्रतिरोध का तापक्रमी गुणांक 1/273 K^{-1}=0.00367K^{-1} के करीब होता है।

सारणी 79. धातुओं और मिश्र धातुओं के अतिचालक की अवस्था में संक्रमण के लिये आवश्यक तापक्रम

द्रव्य	T, K	द्रव्य	T, K
अलुमीनियम	1.2	टैंटेलम	4.4
कैडमियम	0.6	नियोबियम	9.2
जस्ता	0.8	पारा	4.1
जिर्कोनियम	0.3	सीसा	7.3
टिन	3.7		
		मिश्र धातु	
Bi-Pt	0.16	Sn-Hg	4.2
Pb-Au	2.0-7.3	Pb-Ag	5.8-7.3
Sn-Zn	3.7	Pb-Sb	6.6
Pb-Hg	4.1-7.3	Pb-Ca	7.0
		यौगिक	
NiBi	4.2	Nb_2C	9.2
PbSe	5.0	NbC	10.1-10.5
$NbBi_2$	5.5	NbN	15-16
NbB	6	V_3Si	17.1
MoC	7.6-8.3	Nb_3Sn	18

टिप्पणी :—1. अतिचालक मिश्र धातु अधिक अवयवों वाले भी ज्ञात है : रोजे का मिश्र धातु (8.5 **K**), न्यूटन का धातु (8.5 K), वुड का धातु (8.2 K) Pb-As-Bi (9.0 **K**), Pb-As-Bi-Sb (9.0 **K**)

2. अतिचालकता की अवस्था में संक्रमण करने पर यौगिकों व मिश्र धातुओं का प्रतिरोध तापक्रम के पर्याप्त बड़े अंतरालों पर बदलता है (कभी-कभी 2K के अन्तराल पर)। संक्रमण का तापक्रम मिश्र धातुओं के तापोपचार पर भी निर्भर करता है। ऐसी परिस्थितियों के लिये सारणी में संक्रमण के तापक्रम में परिवर्तनों की सीमा दी गयी है।

सारणी 80. उच्च सक्रिय प्रतिरोध वाले मिश्र धातु (20 °C पर)

मिश्र धातु (अवयवानुपात % में)	ρ, 10^{-4} Ω·cm	α, 10^{-3} K^{-1}	t, °C
कन्स्टैंटेन (58.8 Cu, 40 Ni, 1.2 Mn)	0.44-0.52	0.01	500
जर्मन सिल्वर (65 Cu, 20 Zn, 15 Ni)	0.28-0.35	0.04	150-200
निकेलाइन (54 Cu, 20 Zn, 26 Ni)	0.39-0.45	0.02	150-200
निक्रोम (67.5 Ni, 15 Cr, 16 Fe, 1.5 Mn)	1.0-1.1	0.2	1000
फेक्राल (80 Fe, 14 Cr, 6 Al)	1.1-1.3	0.1	900
मैंगेनीन (85 Cu, 12 Mn, 3 Ni)	0.42-0.48	0.03	100
रेयोटैन (84 Cu, 12 Mn, 4 Zn)	0.45-0.52	0.4	150-200

टिप्पणी :—प्रतिरोध के तापक्रमी गुणांक का औसत मान α तापक्रम अन्तराल 0 से 100 °C तक के लिये सही है। सारणी के अंतिम स्तंभ में महत्तम अनुमत तापक्रम दिये गये हैं।

कन्स्टैंटेन के प्रतिरोध का तापक्रम-गुणांक −0.00004 से +0.00001 के अंतराल में बदल सकता है; यह नमूने पर निर्भर करता है। ऋण चिह्न से तात्पर्य है कि तापक्रम बढ़ने पर प्रतिरोध घटता है।

सारणी 81. पृथक्कृत चालक में दीर्घकालीन कार्य के लिये अनुमत धारा-बल (ऐंपियर में)

द्रव्य	अनुप्रस्थ काट का क्षेत्रफल							
	1	1.5	2.5	4	6	10	16	25
अलुमीनियम	8	11	16	20	24	34	60	80
तांबा	11	14	20	25	31	43	75	100
लोहा	—	—	8	10	12	17	30	—

सारणी 82. फ्यूज वायर

धारा-बल, A	5	15	30	60	100
टिन युक्त तांबे के तार का व्यास, mm	0.213	0.508	0.914	1.42	2.03

टिप्पणी :—फ्यूज वायर पर लिखा गया नामत (नोमिनल) धारा-बल महत्तम होता है, जिसे वह लंबे समय तक सहन कर सकता है। नामत मान से 1.8—2 गुना अधिक धारा-बल होने से फ्यूज वायर शीघ्र पिघल जाता है।

जलीय घोलों की विद्युचालकता

चित्र 46. चंद यौगिकों के जलीय घोलों की सांद्रता पर विद्युचालकता की निर्भरता (18 °C पर)। आयनों की मानक सांद्रता दिखायी गयी है। आयनों की मानक सांद्रता की इकाई ऐसा घोल है, जिसके इकाई आयतन में मोल के 1/n भाग आयन होते हैं (n=आयन की संयोजकता)।

सारणी 83. **भिन्न सान्द्रता वाले विद्युविश्लेषकों की प्रतिरोधिता**
(18 °C पर)

घुल्य	c, %	ρ′, Mg/m³	ρ, Ω·cm	ϰ, K^{-1}
अमोनियम क्लोराइड	5	1.011	10.9	0.0198
	10	1.029	5.6	0.0186
	20	1.057	3.8	0.0161
गंधकाम्ल	5	1.032	4.8	0.0121
	20	1.14	1.5	0.0145
	30	1.22	1.4	0.0162
	40	1.30	1.5	0.0178
जिंक सल्फेट	5	1.062	52.4	0.0225
	10	1.107	31.2	0.0223
	20	1.232	21.3	0.0243
ताम्र सल्फेट	5	1.062	52.9	0.0216
	10	1.107	31.5	0.0218
	17.5	1.206	23.8	0.0236
नमकाम्ल	5	1.023	2.5	0.0158
	20	1.1	1.3	0.0154
	40	1.2	1.9	—
नाइट्रिक अम्ल	10	1.05	2.1	0.0145
	20	1.12	1.5	0.0137
	30	1.18	1.3	0.0139
	40	1.25	1.4	0.0150
सोडियम क्लोराइड	5	1.034	14.9	0.0217
	10	1.071	8.3	0.0214
	20	1.148	5.1	0.0716
सोडियम हाइड्रोक्साइड	5	1.05	5.1	0.0201
	10	1.11	3.2	0.0217
	20	1.22	3.0	0.0299
	40	1.43	8.3	0.0648

टिप्पणी :— विद्युविश्लेषकों की प्रतिरोधिता तापक्रम बढ़ने पर घटती है (इसमें वे धातुओं से भिन्न हैं)। अन्य तापक्रमों के लिये प्रतिरोधिता ρ_t निम्न सूत्र से ज्ञात हो सकती है [दे. समीकरण (4.28)] : $\rho_t = \rho_{18}[1 - \varkappa(t - 18)]$, जहां ϰ सारणी प्रदत्त तापक्रम गुणांक है, ρ_{18} 18 °C पर प्रतिरोधिता है और t वह तापक्रम है, जिसके लिये ρ_t ज्ञात की जा रही है (*C* सान्द्रता है, ρ′ विद्युविश्लेषक का घनत्व है)।

सारणी 84. **चंद धातु-युग्मों के तापीय विवाव (mV में)**

संधि-स्थल का तापक्रम, °C	प्लैटिनम-10% रोडियम युक्त प्लैटिनम	लोहा-कंस्टैंटेन	तांबा-कंस्टैंटेन
−200	—	8	5.5
100	0.64	5	4
200	1.44	11	9
300	2.32	16	15
400	3.25	22	21
500	4.22	27	—
600	5.22	33	—
700	6.26	39	—
800	7.33	46	—
1000	9.57	58	—
1500	15.50	—	—

टिप्पणी :— दूसरे जोड़ (संधि-स्थल) का तापक्रम 0°C पर रखा गया है।

सारणी 85. **प्लैटिनम के सापेक्ष अन्तराश्रयी तापीय विवाब**
α (0°C पर)

धातु या धातु-मिश्र	α, μV/K	धातु या धातु-मिश्र	α, μV/K
एंटीमनी	17.0	तांबा	7.4
कंस्टैंटेन	−34.4	बिस्मथ	−65.0
जिंक एंटीमोनाइड	200	लेड टेलुराइड	−300
ताम्र (I) ऑक्साइड	1000	लोहा	16.0
निकेल	−16.4		

टिप्पणी :—ऋण-चिह्न दिखाते हैं कि धारा संधि-स्थल पर α के कम बीजगणितीय मान वाले धातु से बहती है। जैसे, तांबा-कंस्टैंटेन युग्म में गर्म संधि-स्थल पर धारा कंस्टैंटेन से तांबे की ओर बहती है।

ताम्र-कंस्टेंटेन युग्म का अंतराश्रयी तापीय विवाब

चित्र 47. तांबा-कस्टेंटेन युग्म के अंतराश्रयी तापीय विवाब की तापक्रम-निर्भरता ।

सारणी 86. विद्युरासायनिक तुल्यांक

आयन	μ/n, g/mol	k, mg/C	आयन	μ/n, g/mol	k, mg/C
H^+	1.008	0.0104	CO_3^{2-}	30.0	0.3108
O_2^{2-}	8.0	0.0829	Cu^{2+}	31.8	0.3297
Al^{3+}	9.0	0.0936	Zn^{2+}	32.7	0.3387
OH^-	17.0	0.1762	Cl^-	35.5	0.3672
Fe^{3+}	18.6	0.1930	SO_4^{2-}	48.0	0.4975
Ca^{2+}	20.1	0.2077	NO_3^-	62.0	0.642
Na^+	23.0	0.2388	Cu^+	63.6	0.6590
Fe^{2+}	27.8	0.2895	Ag^+	107.9	1.118

टिप्पणी :—प्रतीक पर स्थित ऋण या धन चिह्न की संख्या एक आयन द्वारा वहन किये जाने वाले प्राथमिक आवेशों की संख्या दिखाती है; μ—मोलीय द्रव्यमान, n= संयोजकता ।

सारणी 87. धातुओं के मानक विभव

धातु	V	धातु	V
कैडमियम	−0.40	निकेल	−0.23
क्रोमियम	0.56	पारा	0.86
चांदी	0.80	मैंगनीज	−1.05
जस्ता	−0.76	लोहा	−0.44
तांबा	−0.35	सीसा	−0.13

संचायकों का आवेशन व निरावेशन

(a)

(b)

चित्र 48. (*a*) मानक धारा $Q/4$, A द्वारा अम्लीय संचायक का आवेशन और तीन घंटे के कार्य वाली धारा ($Q/3$, A) द्वारा उसका निरावेशन करने पर उसके एक सेल के सिरों पर वोल्टता में होने वाले परिवर्तन (Q=संचायक की धारिता, C) । (*b*) अम्ल-निकेल (सतत रेखा) और कैडमियम-निकेल (डैश-रेखा) वाले संचायकों के आवेशन व निरावेशन में एक सेल के सिरों पर वोल्टता-परिवर्तन । आवेशन सामान्य कार्य-काल पर हो रहा है, $Q/6$, A (6 घंटे), निरावेशन—5 घंटे वाले कार्य-काल पर ($Q/5$, A) । लोहा-निकेल वाले संचायकों के लिये दिया गया वक्र आठ घंटे ($Q/8$, A) व तीन घंटे ($Q/3$, A) के कार्य-काल में निरावेशन के लिये है ।

सारणी 88. **गैल्वेनिक सेलों के विवाब**

सेल का नाम	ऋण ध्रुव	धन ध्रुव	घोल	विवाब, V
ग्रेने(ट) सेल	जस्ता	कार्बन	12 भाग $K_2Cr_2O_7$, 25 भाग H_2SO_4, 100 भाग H_2O	2.01
क्षारीय चांदी-जस्ता संचायक	जिंक आक्साइड	चांदी	पोटैशियम हाइड्रोक्साइड (KOH) का घोल	1.5
डैनियल सेल	जस्ता	तांबा	विद्युद अलग-अलग घोलों में हैं : जस्ता गंधकाम्ल के घोल में (5-10%) और तांबा कौपर सल्फेट ($CuSO_4$) के संतृप्त घोल में	1.1
लेक्लांचे सेल	जस्ता	कार्बन	अमोनियम क्लोराइड का घोल, बुकनी कार्बन के साथ मैंगनीज पराक्साइड	1.46
लेक्लांचे सेल, सूखा	जस्ता	कार्बन	1 भाग ZnO, 1 भाग NH_4Cl, 3 भाग $ZnCl_2$ और इतना पानी कि लेई-सी बन जाये	1.3
क्षारीय लोहा-निकेल (या कैडमियम-निकेल) संचायक	लोहे की बुकनी (या लौह आक्साइड युक्त कैडमियम)	निकेल डाय-क्साइड	KOH का 20% सांद्रता वाला घोल	1.4-1.1
सीसा-अम्ल संचायक	झांवा सीसा	PbO_2	H_2SO_4 का 27-28% घोल, क्लोरीन से मुक्त, घनत्व 1.20	2.0-1.9 (15 °C पर)
वेस्टन का मानक सेल	कैडमियम का अमलगम	पारा	$CdSO_4$ का संतृप्त घोल, Hg_2SO_4 व $CdSO_4$ का पेस्ट	1.0183

सारणी 89. **जलीय घोलों में आयनों की चंचलता**

(18 °C पर)

धनायन	u_+, 10^{-4} $cm^2/(s\cdot V)$	ऋणायन	u_-, 10^{-4} $cm^2/(s\cdot V)$
H^+	32.63	OH^-	18.0
K^+	6.69	Cl^-	6.8
Na^+	4.5	NO_3^-	6.2
Ag^+	5.6	SO_4^{2-}	6.8
Zn^{2+}	4.8	CO_3^{2-}	6.2
Fe^{3+}	4.6		

टिप्पणी :—1. तापक्रम में 1 °C की वृद्धि होने पर आयनों की चंचलता में करीब 2% की वृद्धि होती है।

2. प्रतीक पर धन या ऋण चिह्नों की संख्या एक आयन द्वारा वहन किये जाने वाले प्राथमिक आवेशों की संख्या है।

सारणी 90. **धातुओं में एलेक्ट्रोनों की चंचलता**

[$cm^2/(s\cdot V)$ में]

धातु	Ag	Na	Be	Cu	Au	Li	Al	Cd	Zn
चंचलता	56	48	44	35	30	19	10	7.9	5.8

टिप्पणी : — धातु के भीतर क्षेत्र की तीव्रता व्यवहारिकतः 1 mV/cm से अधिक नहीं होती, और इसीलिये एलेक्ट्रोनों के वेगों के सांख्यिक मान सारणी-प्रदत्त चंचलता के सांख्यिक मानों से काफी कम होंगे। यह निष्कर्ष सारणी 81 में प्रदत्त अनुमत धारा के मानों का समीकरण (4.24) में प्रयोग करके सरलतापूर्वक प्राप्त किया जा सकता है।

सारणी 91. गैसों में आयनों की चंचलता
(सामान्य दाब व 20°C तापक्रम पर, $cm^2/s \cdot V$ में)

गैस	धनायन	ऋणायन	गैस	धनायन	ऋणायन
ऑक्सीजन	1.3	1.8	हवा, जलवाष्प से संतृप्त	1.4	2.1
आर्गन	1.5	1.7	शुष्क हवा	1.4	1.9
कार्बन डायक्साइड	0.8	0.8	हाइड्रोजन	6.3	8.1
नाइट्रोजन	2.7	—	हीलियम	16.0	—
पारा (दाब 133 Pa)	220	—			

टिप्पणी :— 1. व्यापक स्थिति में चंचलता गैस में विद्युत-क्षेत्र की तीव्रता E और गैस के दाब p के अनुपात पर निर्भर करती है। यदि E/p का मान अधिक न हो, तो चंचलता स्थिर रहती है; जब आयनों के क्रमबद्ध वेगों के मान उनकी तापीय गति के वेगों के साथ तुलनीय होते है, तब चंचलता परिवर्तित होती है।

2. आयन के दिये हुए प्रकार की चंचलता गैस के घनत्व की व्युत्क्रमानुपाती होती है (दाब के अन्तराल 13 से 6×10^6 Pa में)। आयन के आवेश की मात्रा पर चंचलता बहुत कम निर्भर करती है।

3. चंचलता गैस की शुद्धता पर बहुत अधिक निर्भर करती है; इसीलिये सारणी में दी गयी चंचलता को काम-चलाऊ भर मानना चाहिये।

सारणी 92. आयनन में संपन्न कार्य
(आयनन का विभव)

आयनन	E_{ion}, eV	आयनन	E_{ion}, eV
$He \to He^+$	24.5	$H \to H^+$	13.5
$Ne \to Ne^+$	21.5	$O \to O^+$	13.5
$N_2 \to N_2^+$	15.8	$H_2O \to H_2O^+$	13.2
$Ar \to Ar^+$	15.7	$Xe \to Xe^+$	12.8
$H_2 \to H_2^+$	15.4	$O_2 \to O_2^+$	12.5
$N \to N^+$	14.5	$Hg \to Hg^+$	10.4
$CO_2 \to CO_2^+$	14.4	$Na \to Na^+$	5.1
$Kr \to Kr^+$	13.9	$K \to K^+$	4.3

सारणी 93. धातुओं व अर्धचालकों के उत्सर्जन-स्थिरांक

तत्व	A, eV	B, $A/(cm^2 \cdot K^2)$
अलुमीनियम	3.74	—
एंटीमनी	2.35	—
क्रोमियम	4.51	48
जर्मेनियम	4.56	—
टंगस्टन	4.50	60-100
टिन	4.31	—
टेलूरियम	4.12	—
तांबा	4.47	65
थोरियम	3.41	70
निकेल	4.84	30
प्लैटिनम	5.29	32
बेरियम	2.29	—
मोलिब्डेनम	4.37	115
यूरेनियम	3.74	—
लोहा	4.36	26
सीज़ियम	1.89	160
सिलिकन	4.10	—
सेलेनियम	4.72	—

टिप्पणी :— निकासी कार्य सतह की शुद्धता और अशुद्धियों पर बहुत अधिक निर्भर करता है। दिये गये मान शुद्ध नमूनों के लिये हैं।

सारणी 94. धातु पर झिल्लियों के उत्सर्जन-स्थिरांक

धातु	झिल्ली	A, eV	B, A/(cm²·K²)
टंगस्टन	जिर्कोनियम	3.14	5.0
"	थोरियम	2.58	1.5
"	बेरियम	1.56	1.5
"	यूरेनियम	2.81	3.2
"	सीजियम	1.36	3.2
टैंटेलम	थोरियम	2.52	0.5
मोलिब्डेनम	"	2.58	1.5

सारणी 95. ऑक्साइड-अस्तर वाले कैथोडों के उत्सर्जन-स्थिरांक

धनाग्र	A, eV	B, A/(cm²·K²)
बेरियम-ऑक्सीजन-टंगस्टन	1.34	0.18
बेरियम ऑक्सीकृत टंगस्टन पर	1.10	0.3
BaO, निकेल धातु-मिश्र पर	1.50-1.83	0.087-2.18
थोरियम ऑक्साइड के अस्तर वाला कैथोड (औसतमान)	2.59	4.35
निकेल-BaO-SrO	1.20	0.96
Pt-Ni, BaO-SrO	1.37	2.45

सारणी 96. अर्धचालकों के गुण

(t_g — गलनांक, ΔE_0 — वर्जित पट्टी की चौड़ाई, u_n, u_p — क्रमशः एलेक्ट्रोनों व छिद्रों की चंचलताएं)

	t_g, °C	ΔE_0, eV	u_n, cm²/(V·s)	u_p, cm²/(V·s)
आयोडीन (I)	114	1.3	25	—
आर्सेनिक (भूरा) (As)	817	1.2	65	65
एंटीमनी (Sb)	630	0.13	—	—
जर्मेनियम (Ge)	958	0.75	3900	1900
टिन (α) (Sn)	232	0.08	2500	2400
टेलूरियम (Te)	450	0.32	1700	1200
फॉस्फोरस (काला) (P)	44	0.33	220	350
बोरोन (B)	2300	1.16	1	50
सेलेनियम (भूरा) (Se)	217	2.8	—	20
हीरा (C)	4030	5.4	1800	1400
सिलिकन (Si)	1414	1.15	1900	500
PbSe	1065	0.5	1400	1400
PbS	1114	1.2	650	800
AgBr	430	2.0	240	10^5 (1.7 K)
CdS	1750	2.5	350	15-50
Cu_2O	1232	1.5-2.2	100	100
α-Al_2O_3	2050	2.5	—	—
ZnO	1975	3.4	200	—

टिप्पणी :— चंचलता के प्रदत्त मान कमरे के तापक्रम पर चरम क्षेत्र से कम तीव्रताओं के लिये है।

विद्युत-क्षेत्र की तीव्रता पर चंचलता की निर्भरता के कारण अर्धचालकों में ओम के नियम का उल्लंघन प्रेक्षित हो सकता है। क्षेत्र की अल्पतम तीव्रता, जिस पर ओम के नियम का उल्लंघन दिखना शुरू हो जाता है, **चरम-क्षेत्र** (E_{cr}) कहलाती है। $t = 20$ °C पर n-जर्मेनियम में चरम क्षेत्र—0.9 kV/cm, p-जर्मेनियम में—1.4 kV/cm, n-सिलिकन में—2.5 kV/cm, और p-सिलिकन में—7.5k V/cm होती है। तापक्रम घटाने से चरम क्षेत्र भी घटता है।

जर्मेनियम व सिलिकन का विशिष्ट प्रतिरोध

चित्र 49. अशुद्धि-परमाणुओं की सांद्रता पर जर्मेनियम (*I*) व सिलिकन (*II*) के विशिष्ट प्रतिरोध की निर्भरता। तापक्रम $\approx 20°C$।

चित्र 50. तापक्रम पर जर्मेनियम के विशिष्ट प्रतिरोध की निर्भरता। ऊर्ध्व अक्ष पर प्रतिरोध के मान लघुगणकी पैमाने पर लिये गये हैं और क्षैतिज अक्ष पर— परम तापक्रम की व्युत्क्रम राशि; N_{Ge}— जर्मेनियम-परमाणुओं की संख्या, N_{Sb}— एंटीमनी के परमाणुओं की संख्या।

चपटे विद्युदों के बीच तड़क-वोल्टता

चित्र 51. चपटे धातुई विद्युदों के लिये राशि pd पर तड़क-वोल्टता की निर्भरता (p=गैस का दाब, d=विद्युदों की आपसी दूरी)।

सारणी 97. **हवा में स्फुलिंगाकाश**
(सामान्य दाब पर, mm में)

क्षेत्र की तीव्रता (वोल्टता) kV	धातुई इलेक्ट्रोडों के रूप		
	दो बिंदु	5 cm व्यास वाले दो वर्तुल	दो पत्तर
20	15.5	5.8	6.1
40	45.5	13	13.7
100	200	45	36.7
200	410	262	75.3
300	600	530	114

C. चुंबकीय क्षेत्र, विद्युचुंबकीय प्रेरण

मूल अवधारणाएं और नियम

1. चुंबकीय प्रेरण. धाराओं की व्यतिक्रिया. चुंबकीय आघूर्ण

धारायुक्त चालकों, चुंबकों व धारायुक्त चालकों, चुंबकों के बीच व्यतिक्रिया (परस्पर या आपसी क्रिया) होती है। यह व्यतिक्रिया एक (भौतिक) क्षेत्र के माध्यम से होती है, जिसे **चुंबकीय क्षेत्र** कहते हैं। चुंबकीय क्षेत्र उन मापतंत्रों में प्रेक्षित होता है, जिनके सापेक्ष आवेशों की गति क्रमबद्ध (सुव्यवस्थित) होती है। जिन मापतंत्रों के सापेक्ष आवेश गतिहीन होते हैं, उनमें चुंबकीय क्षेत्र का कोई अस्तित्व नहीं होता।

चुंबकीय क्षेत्र की उपस्थिति का ज्ञान चुंबकीय सुई व धारायुक्त चालकों (या गतिमान आवेशों) पर उसके प्रभाव के कारण होता है ; इस प्रभाव को उत्पन्न करने वाले बल **चुंबकीय बल** कहलाते हैं। गतिहीन, स्थिर आवेशों पर चुंबकीय बल का कोई प्रभाव नहीं होता।

चुंबकीय क्षेत्र को लछित (कैरेक्टेराइज) करने के लिए सदिष्ट राशि **B** प्रयुक्त होती है, जिसे **चुंबकीय प्रेरण** कहते हैं। सदिश चुंबकीय प्रेरण की दिशा क्षेत्र के दिए हुए बिंदु पर स्थित चुंबकीय सुई के उत्तरी छोर पर

क्रियाशील बल की दिशा के साथ संपात करती है। चुंबकीय क्षेत्र में रखे हुए धारायुक्त **चालक** पर क्रियाशील बल ऐंपियर के **नियम** द्वारा निर्धारित होता है। (चित्र 52) :

$$\Delta \mathbf{F} = kI\,[\Delta \mathbf{l} \mathbf{B}],\quad |\Delta \mathbf{F}| = kI\Delta l B \sin \beta \qquad (4.50)$$

जहां I=धारा-बल, Δl= चालक की अत्यल्प (मौलिक या प्राथमिक) लंबाई (चालक की लंबाई का मूल), $\mathbf{B}$ = चुंबकीय प्रेरण, β=$\mathbf{B}$ व $\Delta \mathbf{l}$ के बीच

चित्र 52. धारायुक्त चालक-मूल पर क्रियाशील ऐंपियर-बल।

का कोण। चालक की मूल लंबाई $\Delta \mathbf{l}$ एक सदिश है, जिसकी दिशा धारा की दिशा के साथ संपात करती है। गुणनफल $I\Delta \mathbf{l}$ को **धारा-मूल** कहते हैं। समानुपातिकता का संगुणक k इकाइयों के चयन पर निर्भर करता है; यदि सभी राशियां एक ही प्रणाली में व्यक्त हैं, तो $k = 1$।

मापांक के अनुसार चुंबकीय प्रेरण उस बल के बराबर होता है, जिससे चुंबकीय क्षेत्र सदिश प्रेरण के अभिलंब स्थित इकाई धारा-मूल ($I\Delta l = 1$) पर क्रिया करता है। चुंबकीय प्रेरण माध्यम के गुणों पर निर्भर करता है।

अ. प्र. में प्रेरण की इकाई **टेसला** (T) है। 1 T ऐसे क्षेत्र का चुंबकीय प्रेरण है, जो सदिश प्रेरण के अभिलंब स्थित इकाई धारा-मूल 1 A·m पर 1N बल लगाता है।

चुंबकीय प्रेरण **B** के साथ-साथ एक और राशि प्रयुक्त होती है— चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता **H**। निर्वात में **चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता** ऐसी राशि को कहते हैं, जो चुंबकीय प्रेरण **B** और चुंबकीय स्थिरांक μ_0 के अनुपात, अर्थात् $\mathbf{H} = \mathbf{B}/\mu_0$ के बराबर होती है। अ. प्र. में $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m $= 1.26 \cdot 10^{-6}$ H/m। किसी अन्य माध्यम में चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता $\mathbf{H} = \mathbf{B}/(\mu\mu_0)$ के बराबर होती है, जहां μ = माध्यम की सापेक्षिक **चुंबकीय वेधिता** है। गुणनफल $\mu\mu_0 = \mu_a$ को माध्यम की परम चुंबकीय **वेधिता** कहते हैं।

चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता की इकाई ऐंपियर प्रति मीटर (A/m) है। 1 A/m चुंबकीय क्षेत्र की ऐसी तीव्रता है, जो 4πA धारा वाले अनंत लंबे ऋजु चालक द्वारा उससे 2 m की दूरी पर उत्पन्न होती है।

चुंबकीय वेधिता μ वाले माध्यम में धाराओं की व्यतिक्रिया μ गुनी अधिक होगी, बनिस्बत कि निर्वात में उनकी व्यतिक्रिया के [दे. (4.51)]। **संपर्यक** (सब दिशाओं में समान गुण रखने वाले) **माध्यम** में सदिश **B** और **H** समान दिशाएं रखते हैं।

μ_0 की विमीयता और उसका सांख्यिक मान इकाइयों की प्रणाली के चयन पर निर्भर करते हैं (पृ. 287)। **सापेक्षिक चुंबकीय वेधिता** μ इकाइयों की प्रणाली के चयन पर निर्भर नहीं करती; इसके मान अक्सर निर्देशिका-तालिकाओं में दिये जाते हैं।

चित्र 53. बायें हाथ का नियम।

धारायुक्त चालक पर क्रियाशील बल की दिशा **बायें हाथ के नियम** द्वारा निर्धारित होती है : यदि चुंबकीय क्षेत्र की बल-रेखाएं बायीं हथेली पर लंबवत आपतन कर रही हैं और सिमटी उंगलियां धारा की दिशा दिखा रही हैं, तो दूर खिंचा हुआ अंगूठा चालक पर क्रियाशील बल की दिशा दिखाता है (चित्र 53)।

दो पर्याप्त लंबे, ऋजु, समानांतर व धारायुक्त चालक आपस में इस प्रकार व्यतिक्रिया करते हैं कि, यदि उनमें धारा की दिशाएं **समान होती हैं**, तो वे परस्पर आकर्षित होते हैं; धारा की दिशाएं विपरीत होने पर वे विकर्षित होते हैं। इस नियम की गणितीय अभिव्यंजना निम्न है :

$$F=\frac{\mu\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a}l, \qquad (4.51)$$

जहां a= चालकों की आपसी दूरी, l= चालकों की लम्बाई, I_1, I_2= चालकों में धारा-बल, μ= उस माध्यम की चुंबकीय वेधिता, जिसमें चालक स्थित हैं। (4.51) के आधार पर **धारा-बल की इकाई** — **ऐंपियर** — निर्धारित की जाती है। **ऐंपियर** *एक अपरिवर्तनशील धारा का बल है, जो निर्वात में परस्पर 1 m दूर स्थित नगण्य अनुप्रस्थ काट वाले दो अनंत लंबे, ऋजु व समानांतर चालकों में बह कर उनके 1 m लंबे भाग पर* $2\cdot10^{-7}$ *N के बराबर व्यतिक्रिया बल उत्पन्न करती है।*

चुंबकीय क्षेत्र में गतिमान आवेश (आविष्ट कण) पर एक बल क्रियाशील हो जाता है, जिसे **लौरेंस-बल** कहते हैं :

$$\mathbf{F}_L=Q[\mathbf{vB}], \text{ मापांक } \mathbf{F}_L=QvB\sin\alpha, \qquad (4.52)$$

जहां Q= कण का आवेश, $\mathbf{v}$= वेग, α= वेग व प्रेरण **B** के बीच का कोण। लौरेंस-बल की दिशा उस तल पर लंब होती है, जिसमें सदिश **v** व **B** स्थित होते हैं।

चुंबकीय क्षेत्र में रखी गयी समतली धारा-आकृति (फंदे) पर बलाघूर्ण **M** क्रिया करता है :

$$\mathbf{M}=IS[\mathbf{nB}], \ |\mathbf{M}|=ISB\sin\alpha, \qquad (4.53)$$

जहां I= धारा-बल, S= आकृति का क्षेत्रफल, **B**= चुंबकीय प्रेरण, α = आकृति के तल के लंब और सदिश **B** के बीच का कोण, **n**= आकृति पर लंबवत इकाई सदिश।

राशि $p_m=IS$ को **आकृति का चुंबकीय आघूर्ण** कहते हैं। चुंबकीय आघूर्ण एक सदिष्ट राशि है; इसकी दिशा दक्षिण पेंच के नियम से निर्धारित होती है : यदि पेंच को आकृति में बहती धारा की दिशा में घुमाया जाये, तो पेंच की अग्रवर्ती गति की दिशा p_m की दिशा के साथ संपात करेगी।

कई-एक आकृतियों का चुंबकीय आघूर्ण उनके चुंबकीय आघूर्णों के सदिष्ट योग के बराबर होता है।

Q आवेश वाला कण जब त्रिज्या R वाले वृत्तीय कक्ष पर रैखिक वेग v से घूमता है, तो उसका चुंबकीय आघूर्ण (मापांक में) निम्न सूत्र द्वारा निर्धारित होता है :

$$p_m = QvR/2. \qquad (4.54)$$

2. गतिशील आवेशों की व्यतिक्रिया

व्यतिक्रिया का कलन लौरेंस के रूपांतरकारी सूत्र के सहारे किया जाता है (दे. पृ. 9)। जब आवेश मापतंत्र के सापेक्ष अचल रहते हैं, तो इस तंत्र में उनकी व्यतिक्रिया का फल कूलंब के नियम के अनुसार कलित होता है (दे. पृ. 128)।

यदि एक आवेश, जैसे Q_1 (चित्र 54), अक्ष Ox के अनुतीर वेग v_1 से गतिमान है, और आवेश Q_2 अचल है, तो आवेश Q_2 पर क्रियाशील बल

चित्र 54. समान चिह्नों वाले गतिमान आवेशों की व्यतिक्रिया।

मान और दिशा में बदलता रहता है : बल का घटक F_x ज्यों-का-त्यों रहता है; घटक F_y बढ़ता है और उसका मान

$$F_y = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \cdot \frac{\sin\alpha}{\sqrt{1 - v_1^2/c^2}} \qquad (4.55)$$

होता है।

उस स्थिति में, जब दोनों ही आवेश अक्ष Ox के समानांतर गतिमान रहते हैं : Q_1—वेग v_1 से और Q_2—वेग v_2 से, आवेश Q_2 पर F_y के अलावे एक अतिरिक्त बल $\Delta F''_y$ क्रियाशील हो जाता है :

$$\Delta F''_y = -\frac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2_{12}} \cdot \frac{v_1 v_2 \sin\alpha}{c^2\sqrt{1 - v_1^2/c^2}}\, \mathbf{j}_y, \qquad (4.56)$$

जहां $\mathbf{j}_y$ = अक्ष O_y के अनुतीर इकाई सदिश, $\mathbf{r}_{12}$ = Q_1 से Q_2 तक खींचा गया त्रिज्य सदिश, α = $\mathbf{r}_{12}$ व $\mathbf{v}_1$ के बीच का कोण। घटक F_x स्थिर रहता है। गतिमान आवेश Q_2 पर क्रियाशील बल $\mathbf{F}''_{12}$ की दिशा $\mathbf{r}_{12}$ दिशा के साथ संपात नहीं करती और इसी में यह बल कूलंब के बल से भिन्न है।

आवेश Q_2 के वैद्युत क्षेत्र में गतिमान आवेश Q_1 पर बल का एक अतिरिक्त घटक क्रियाशील होता है :

$$\Delta F_y' = -\frac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2_{21}} \cdot \frac{v_1 v_2 \sin\alpha}{c^2\sqrt{1 - v^2_2/c^2}}\, \mathbf{j}_y. \qquad (4.57)$$

इस प्रकार, $|\Delta\mathbf{F}_y''| \neq |\Delta\mathbf{F}_y'|$, यदि $|\mathbf{v}_2| \neq |\mathbf{v}_1|$.

व्यापक स्थिति में गतिमान आवेश Q_1 के वैद्युत क्षेत्र में स्थित गतिमान आवेश Q_2 पर क्रियाशील बल $\mathbf{F}'_{12}$, और गतिमान आवेश Q_2 के विद्युत-क्षेत्र में स्थित गतिमान आवेश Q_1 पर क्रियाशील बल $\mathbf{F}'_{21}$ मापांक में समान नहीं होते; इनबलों की दिशाए आवेशों से गुजरने वाली सरल रेखा के साथ संपात नहीं करती।

अल्प वेगों ($v \ll c$) के लिए

$$\Delta\mathbf{F}_y = -\frac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \cdot \frac{v_1 v_2 \sin\alpha}{c^2}\, \mathbf{j}_y. \qquad (4.58)$$

इस बल को **चुंबकीय बल** कहते है। यदि जड़त्वी तंत्र किसी एक आवेश के साथ जुड़ा होगा, तो इस तंत्र में चुंबकीय क्षेत्र नहीं होगा; इस स्थिति में व्यतिक्रिया सिर्फ आवेशों के रैखिक घनत्व में परिवर्तन के कारण उत्पन्न विद्युत-क्षेत्र द्वारा निश्चित होती है। यदि धारायुक्त चालकों की व्यतिक्रिया के बारे में बात चल रही है, तो उनके बीच कूलंब द्वारा वर्णित व्यतिक्रिया शून्य होती है, क्योंकि विद्युत की दृष्टि से चालक उदासीन होते हैं (आवेशों का योग शून्य के बराबर होता है), और इसीलिए सिर्फ सूत्र (4.56) द्वारा निरूपित व्यतिक्रिया प्रेक्षित होती है।

3. निर्वात में चुंबकीय क्षेत्र

चुंबकीय क्षेत्र की **बल-रेखाएं** ऐसी रेखाओं को कहते हैं, जिनकी स्पर्श रेखाएं दिये हुए बिंदु पर क्षेत्र की तीव्रता की दिशा के साथ संपात करती हैं। क्षेत्र की चुंबकीय बल-रेखाएं संवृत होती हैं। (विद्युत्स्थैतिक क्षेत्र की बल रेखाएं इनसे इसी बात में भिन्न होती हैं)। ऋजुरेखिक धारा की बल-रेखाएं चालक के अभिलंब तल पर स्थित सहकेंद्रीय वृत्त होती हैं। (चित्र 55)। चुंबकीय क्षेत्र की बल-रेखा की दिशा **दक्षिण पेंच के नियम** से निर्धारित होती है : यदि पेंच को इस प्रकार घुमाया जाये कि, वह धारा की दिशा में आगे बढ़े, तो उसे घुमाने की दिशा बल-रेखाओं की दिशा बताती है (चित्र 55)।

धारा-मूल $\mathbf{I}\Delta\mathbf{l}$ द्वारा उत्पन्न चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता :

$$\Delta\mathbf{H}=\frac{\mathbf{I}\,|\,\Delta\mathbf{l}\mathbf{r}_0\,|}{4\pi r^2},$$

$$|\,\Delta\mathbf{H}\,|=\frac{I\Delta l\,\sin\alpha}{4\pi r^2}, \qquad (4.59)$$

चित्र 55. बियो-सावार्ट-लैप्लेस नियम का स्पष्टीकरण। दक्षिण पेंच का नियम।

जहां $\mathbf{r}$=धारा-मूल से उस बिंदु तक खींचा गया त्रिज्य सदिश, जिस पर तीव्रता ज्ञात करनी है, $\alpha=\Delta\mathbf{l}$ व $\mathbf{r}$ के बीच का कोण, $\mathbf{r}_0$=इकाई सदिश। इस संबंध को **बियो-सावार्ट-लैप्लेस** का नियम कहते हैं।

धारायुक्त लंबे ऋजु चालक के विद्युत-क्षेत्र की तीव्रता

$$\mathbf{H}=\frac{\mathbf{I}}{2\pi a}, \qquad (4.60)$$

जहां a=चालक से क्षेत्र के उस बिंदु तक की लांबिक दूरी, जिस पर तीव्रता ज्ञात करनी है।

वृत्ताकार धारा के केंद्र में चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता :

$$H_{\text{vr}}=I/(2R), \qquad (4.61)$$

जहां R=वृत्त की त्रिज्या।

छल्लज (छल्ले पर तार लपेटने से बनी कुंडली, चित्र 56) के भीतर क्षेत्र की तीव्रता :

$$H_{\text{ch}}=NI/(2\pi r), \qquad (4.62)$$

जहां N=लपेटनों की कुल संख्या, r=छल्ले की औसत त्रिज्या।

यदि ऋजु **नलिज** (सीधी नली पर तार लपेटने से बनी कुंडली) की

चित्र 56. छल्लज।

लंबाई लपेटनों के व्यास की तुलना में अत्यधिक बड़ी है, तो ऐसे नलिज के भीतर (लपेटनों से दूर, नलिज के अक्ष पर) क्षेत्र की तीव्रता H_n सभी बिंदुओं पर समान होती है :

$$H_n=nI, \qquad (4.63)$$

जहां n=नलिज की इकाई लंबाई पर लपेटनों की संख्या। पर्याप्त लंबे नलिज में क्षेत्र समरूप होता है।

गतिमान आविष्ट कण (चित्र 57) के क्षेत्र की तीव्रता :

$$\mathbf{H}_Q=\frac{Q\,[\mathbf{v}\mathbf{r}_0]}{4\pi r^2}, \qquad (4.64)$$

और

$$\text{मापांक } \mathbf{H}_Q=\frac{Qv\,\sin\theta}{4\pi r^2},$$

जहां Q = कण का आवेश, $\mathbf{v}$ = उसका वेग, $\mathbf{r}$ = कण से उस बिंदु तक खींचा

चित्र 57. गतिमान कण का चुंबकीय क्षेत्र ।

गया त्रिज्य सदिश, जिस पर क्षेत्र की तीव्रता ज्ञात करनी है, θ = $\mathbf{v}$ व $\mathbf{r}$ के बीच का कोण, r_0 = इकाई सदिश ।

4. चुंबकीय क्षेत्र में धारायुक्त चालक के स्थानांतरण से संपन्न कार्य. विद्युचुंबकीय प्रेरण

समरूप क्षेत्र में समतली आकृति से गुजरने वाला **चुंबकीय प्रवाह** चुंबकीय प्रेरण के मापांक B, आकृति के क्षेत्रफल S और आकृति के तल के अभिलंब के साथ क्षेत्र की दिशा द्वारा बने कोण α की कोज्या के गुणनफल को कहते हैं (चित्र 58) :

चित्र 58. चुंबकीय प्रवाह की परिभाषा।

$$\phi = \mathbf{B}\mathbf{n}S = BS \cos \alpha, \qquad (4.65)$$

जहां $\mathbf{n}$ = तल की लंब दिशा में इकाई सदिश ।

चुंबकीय प्रवाह की इकाई **वेबेर** (Wb) है । 1 Wb ऐसा चुंबकीय प्रवाह है, जो 1 T प्रेरण वाले समरूप चुंबकीय क्षेत्र के कारण अभिलंबी काट के 1 m^2 क्षेत्र से गुजरता है ।

चुंबकीय क्षेत्र में धारायुक्त चालक की गति के कारण संपन्न कार्य

$$A = I(\phi_2 - \phi_1), \qquad (4.66)$$

जहां ϕ_1 = स्थानांतरण के आरंभ में धाराकृति से गुजरने वाला चुंबकीय प्रवाह, ϕ_2 = स्थानांतरण के अंत में चुंबकीय प्रवाह ।

परिवर्तनशील चुंबकीय प्रवाह संवृत बल-रेखाओं वाला विद्युत-क्षेत्र (बवंडरी या **चक्रवातिक विद्युत-क्षेत्र**) उत्पन्न करता है । प्रेरित क्षेत्र चालक में परार बल (पृ. 143) की क्रिया के रूप में प्रकट होता है । इस संवृति को **विद्युचुंबकीय** (संक्षेप में—**विच**) **प्रेरण** कहते है और इससे उत्पन्न विद्युवाहक बल को **प्रेरण का विवाब** कहते हैं । प्रेरण के विवाब से उत्पन्न धारा **प्रेरित धारा** कहलाती है । प्रेरित धारा की दिशा ऐसी होती है कि, उसका चुंबकीय क्षेत्र प्रेरित धारा को उत्पन्न करने वाले चुंबकीय क्षेत्र को परिवर्तित होने से रोकता है **(लेंत्स का नियम)** ।

प्रेरण का विवाब निम्न सूत्र द्वारा ज्ञात किया जा सकता है :

$$\mathscr{E} = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t}. \qquad (4.67)$$

अर्थात्, मापांक के अनुसार प्रेरण का विवाब आकृति द्वारा घिरे क्षेत्र से गुजरने वाले चुंबकीय प्रवाह में परिवर्तन की दर के बराबर होता है । विवाब व $\Delta\phi/\Delta t$ के चिह्न विपरीत हैं (लेंत्स के नियमानुसार) ।

5. स्वप्रेरण

चालक में बहने वाली धारा में किसी भी प्रकार का परिवर्तन होने पर उसमें प्रेरण का विवाब उत्पन्न हो जाता है, जिसका कारण इस धारा का चुंबकीय प्रवाह होता है । संवृति को **स्वप्रेरण** कहते है ।

स्वप्रेरण का विवाब ज्ञात करने के लिए सूत्र है :

$$\mathscr{E} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}, \qquad (4.68)$$

जहां L = प्रेरिता, $\Delta I/\Delta t$ = धारा-बल में परिवर्तन की दर। L चालक के रूप व आकार पर तथा माध्यम के गुणों पर निर्भर करता है :

प्रेरिता एक भौतिक राशि है, जो इकाई दर से परिवर्तित होने वाली परिवर्ती धारा से उत्पन्न प्रेरण-विवाब के सांख्यिक मान के बराबर होती है।

अ. प्र. में प्रेरिता की इकाई **हेनरी** (H) है। 1 H ऐसे चालक की प्रेरिता है, जिसमें 1 s में 1 A धारा-परिवर्तन से 1 V के बराबर प्रेरण-विवाब उत्पन्न होता है।

क्रोड़युक्त (रीढ़युक्त) नलिज की प्रेरिता :

$$L=\frac{k\mu\mu_0 N^2 S}{l} \qquad (4.69)$$

जहां μ = चुंबकीय वेधिता, N = लपेटनों की संख्या, S = नलिज के अनुप्रस्थ काट का क्षेत्रफल, l = लंबाई, जिस पर तार लपेटा गया है, k = संगुणक, जो l/d पर निर्भर करता है (d लपेटन का व्यास है)। k के मान सारणी 107 में दिये गये हैं।

लंबाई l वाले समक्षीय केबिल की प्रेरिता :

$$L=\frac{l}{2\pi}\mu\mu_0 \ln\frac{R_2}{R_1}. \qquad (4.70)$$

जहां R_2 व R_1 वाह्य एवं आंतरिक बेलनों की त्रिज्याएं हैं।

बिजली की दुतारी लाइन (लंबाई = l, तारों के अनुप्रस्थ काट की त्रिज्या = r) की प्रेरिता :

$$L=\frac{l}{\pi}\mu\mu_0 \ln\frac{a}{r}, \qquad (4.71)$$

जहां a = तारों के अक्षों की आपसी दूरी ($r \ll a$ होने पर)।

चुंबकीय क्षेत्र द्वारा छेके गये व्योम में ऊर्जा वितरित रहती है। धारा-बल I वाले चालक के गिर्द बने चुंबकीय क्षेत्र की ऊर्जा W निर्धारित करने के लिए सूत्र है

$$W=\frac{1}{2}LI^2. \qquad (4.72)$$

समरूप (सम-सर्वत्र) चुंबकीय क्षेत्र की ऊर्जा का घनत्व (इकाई व्योम में उपस्थित ऊर्जा का मान) निम्न सूत्र द्वारा ज्ञात होता है :

$$w=\frac{1}{2}\mu\mu_0 H^2, \qquad (4.73)$$

जहां H = चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता।

विद्युचुंबक का उत्थापक बल :

$$F=\frac{B^2 S}{2\mu_0}, \qquad (4.74)$$

जहां S = विद्युचुंबक के सिरे का अनुप्रस्थ काट, B = चुंबकीय प्रेरण।

भंवरी धारा या **फूको** (Foucault, फ्रांस के वैज्ञानिक) की धारा एक प्रेरित धारा है, जो परिवर्ती चुंबकीय क्षेत्र के कारण भारी-भरकम चालकों में उत्पन्न होती है।

6. द्रव में चुंबकीय क्षेत्र

चुंबकीय क्षेत्र में स्थित किसी भी पिंड में चुंबकीय आघूर्ण उत्पन्न हो जाता है। इस सवृत्ति को **चुंबकन** कहते हैं। चुंबकित पिंड **चुंबिक** कहलाता है।

चुंबिक में चुंबकीय क्षेत्र दो घटकों से बना होता है : चालकों में प्रवाहमान स्थूल धाराओं के कारण उत्पन्न प्रेरण $\mathbf{B}_0 = \mu_0\mu\mathbf{H}$ वाले क्षेत्र से और माध्यम में बहने वाली सूक्ष्म धाराओं के कारण उत्पन्न प्रेरण $\mathbf{B}_m$ वाले अतिरिक्त क्षेत्र से। प्रेरण $\mathbf{B}_m$ अंतराण्विक दूरियों पर काफी भिन्न मान रखता है, इसीलिए इस राशि का औसत मान $\langle\mathbf{B}_m\rangle$ निर्धारित करना पड़ता है। माध्यम में परिणामी चुंबकीय क्षेत्र का प्रेरण $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \langle\mathbf{B}_m\rangle$ होता है।

द्रव्य के अणुओं में सवृत धाराएं परिसंचारित होती हैं; इस प्रकार की प्रत्येक धारा का अपना चुंबकीय का आघूर्ण होता है (दे. पृ. 175)। बाह्य चुंबकीय क्षेत्र की अनुपस्थिति में आण्विक धाराओं का अभिमुखन बेतरतीब होता है और उनके द्वारा उत्पन्न औसत क्षेत्र शून्य के बराबर होता है। चुंबकीय क्षेत्र के प्रभाव से अणुओं के चुंबकीय आघूर्ण मुख्यतः क्षेत्र के अनुतीर अभिमुखित हो जाते हैं, जिसके कारण द्रव्य चुंबकित हो जाता है। द्रव्य के चुंबकन का स्तर चुंबकनता द्वारा निर्धारित होता है। चुंबकनता **J** (पहले इसे चुंबकन का सदिश कहते थे) द्रव्य के इकाई आयतन में स्थित अणुओं के सभी चुंबकीय आघूर्णों $\mathbf{p}_m$ के सदिष्ट योग के बराबर होती है :

$$\mathbf{J} = (\Sigma \mathbf{p}_m)/V. \qquad (4.75)$$

चुंबकनता चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता-सदिश की समानुपाती होती है :

$$\mathbf{J} = \varkappa \mathbf{H} \qquad (4.76)$$

राशि $\varkappa$ को **चुंबकीय प्रवणता** कहते हैं; यह एक विमाहीन राशि है । **B**, **H**, **J** और μ व $\varkappa$ के बीच निम्न संबंध है :

$$\langle \mathbf{B}_m \rangle = \mu_0 \mathbf{J},\ \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{J},\ \mu = 1 + \varkappa. \qquad (4.77)$$

किसी द्रव्य की **विशिष्ट प्रवणता** $\varkappa_\rho$, उस द्रव्य की ग्राह्यता (प्रवणता) $\varkappa$ व उसके घनत्व ρ से अनुपात के बराबर होती है, अर्थात् $\varkappa_\rho = \varkappa/\rho$.

H पर *B* (या *J*) की निर्भरता निर्धारित करने वाले वक्र को **चुंबकन का वक्र** कहते हैं ।

जिन द्रव्यों के लिए $\varkappa$ शून्य से थोड़ा सा अधिक होता है, उन्हें **पराचुंबकीय पदार्थ (पराचुंबिक)** कहते हैं; जिन द्रव्यों के लिए $\varkappa < 0$, वे **पारचुंबकीय पदार्थ (पारचुंबिक)** कहलाते हैं । जिन द्रव्यों के लिए $\varkappa$ इकाई से बहुत अधिक होता है, उन्हें **लौहचुंबिक** का नाम दिया गया है ।

लौहचुंबिक पराचुंबिक व पारचुंबिक से कई गुणों में भिन्न होते हैं ।

चित्र 59. चिरावन-पाश: 01-अचुंबकित अवस्था से चुंबकन का वक्र, 123-अचुंबकन का वक्र ।

(a) लौहचुंबिकों का चुंबकन-वक्र जटिल प्रकृति का होता है (चित्र 59); पारचुंबिकों के लिए वह धनात्मक कोणिक संगुणक वाली सरल रेखा जैसा होता है और पारचुंबिकों के लिए ऋणात्मक कोणिक संगुणक वाली सरल रेखा जैसा ।

लौहचुंबिकों की चुंबकीय ग्राह्यता और वेधिता क्षेत्र की तीव्रता पर निर्भर करती हैं; पराचुंबिकों व पारचुंबिकों में ऐसी निर्भरता नहीं होती ।

लौहचुंबिकों के लिए अक्सर आरंभिक चुंबकीय वेधिता (μ_a) निर्दिष्ट की जाती है; यह चुंबकीय वेधिता का सीमांत मूल्य है, जब क्षेत्र की तीव्रता और उसका प्रेरण शून्य के निकट होता है, अर्थात

$$\mu_a = \lim_{H \to 0} \mu.$$

लौहचुंबिकों के लिए *H* पर μ की निर्भरता का वक्र अपने उच्चिष्ठ से गुजरता है (दे. चित्र 61a) । अक्सर महत्तम मान μ_{max} भी दिखाया जाता है (दे. सा 98 व 99) ।

(b) लौहचुंबिकों की चुंबकीय ग्राह्यता तापक्रम के साथ-साथ बढ़ती है । एक नियत तापक्रम T_C पर लौहचुंबिक पराचुंबिक में परिणत हो जाता है ; इस तापक्रम को **क्यूरी-तापक्रम** या **क्यूरी-बिंदु** कहते हैं । क्यूरी-बिंदु से ऊंचे तापक्रमों पर द्रव्य पराचुंबिक होता है । क्यूरी-तापक्रम के पास लौहचुंबिक की चुंबकीय ग्राह्यता तेजी से बढ़ जाती है ।

पारचुंबिकों और कुछ पराचुंबिकों (जैसे क्षारीय धातुओं) में चुंबकीय ग्राह्यता तापक्रम पर निर्भर नहीं करती । पराचुंबिकों की चुंबकीय ग्राह्यता (कुछेक अपवादों को छोड़ कर) परम तापक्रम के व्युत्क्रम अनुपात में परिवर्तित होती है ।

(c) निचुंबकित लौहचुंबिक बाह्य चुंबकीय क्षेत्र द्वारा चुंबकित हो जाता है; *H* पर *B* (या *J*) की निर्भरता वक्र 0-1 द्वारा निरूपित है (दे. चित्र 59) । इसे **चुंबकन का आरंभिक वक्र** कहते हैं । क्षीण क्षेत्र में चुंबकन तेजी के साथ बढ़ता है, फिर धीमा हो जाता है और अंत में संतृप्ति की अवस्था आ जाती है और क्षेत्र (की शक्ति) में और वृद्धि करने पर भी चुंबकन व्यावहारिकतः स्थिर रहता है ।

चुंबकनता *J* का महत्तम मान संतृप्ति-चुंबकनता (J_s) कहलाता है । *H* को शून्य तक कम करने पर *B* (या *J*) वक्र 1-2 के अनुसार बदलता है : प्रेरण में परिवर्तन क्षेत्र की तीव्रता में होने वाले परिवर्तन से पीछे छूटने लगता है; इस संवृति को **चुंबकीय चिरावन** (magnetic hysteresis[1]) कहते हैं ।

1. यूनानी **husteresis** (=देर से आना) शब्द से । —अनु.

क्षेत्र हटा लेने पर (जब $H=0$) बचा हुआ चुंबकीय प्रेरण **अवशिष्ट चुंबकीय प्रेरण** (B_r) कहलाता है। चित्र 59 में यह खंड 0-2 के बराबर है। लौहचुंबिक को निचुंबकित करने के लिए अवशिष्ट प्रेरण को दूर करना पड़ता है। इसके लिए आवश्यक है कि विपरीत दिशा वाला क्षेत्र उत्पन्न किया जाये। विपरीत दिशा वाले क्षेत्र में चुंबकीय प्रेरण का परिवर्तन-वक्र 2-3-4 द्वारा निरूपित होगा। क्षेत्र की तीव्रता H_c (चित्र 59 में खंड 0-3), जिस पर चुंबकीय प्रेरण शून्य के बराबर हो जाता है, **निग्रही तीव्रता** (या बल) कहलाती है।

$+H$ से $-H$ के अंतराल में चुंबकीय क्षेत्र की आवर्त रूप से परिवर्तनशील तीव्रता पर B (या J) की निर्भरता वक्र 1-2-3-4-5-6-1 द्वारा निरूपित होती है। ऐसे निर्भरता-वक्र को **चिरावन-पाश** कहते हैं।

क्षेत्र की तीव्रता में $+$ से $-H$ तक के परिवर्तन के एक चक्र में खर्च हुई ऊर्जा चिरावन-पाश के क्षेत्रफल की समानुपाती होती है।

लौहचुंबिकों के गुणों का कारण उनमें ऐसे 'इलाकों' की उपस्थिति है, जो वाह्य चुंबकीय क्षेत्र के बिना ही स्वतःस्फूर्त रूप से संतृप्ति की अवस्था तक चुंबकित होते हैं; ऐसे 'इलाकों' को **प्रांत** कहते हैं। प्रांतों की स्थिति और चुंबकनता ऐसी होती हैं कि क्षेत्र की अनुपस्थिति में कुल जोड़ी गयी चुंबकनता शून्य के बराबर होती है। जब लौहचुंबिकों को चुंबकीय क्षेत्र में रखा जाता है, तब प्रांतों के बीच की सीमा-रेखाएं स्थानांतरित हो जाती हैं (क्षीण क्षेत्रों में), प्रांतों की चुंबकनता के सदिश चुंबक्कारी क्षेत्र की दिशा में घूम जाते हैं (प्रबल क्षेत्रों में) और फलस्वरूप लौहचुंबिक चुंबकित हो जाते हैं।

चुंबकीय क्षेत्र में रखे गये लौहचुंबिक के रैखिक नापों में परिवर्तन होता है, अर्थात् उसकी रूप-विकृति होती है। इस संवृति को **चुंबकीय अपरूपण** कहते हैं। लंबाई में सापेक्षिक वृद्धि लौहचुंबिक की प्रकृति और चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता पर निर्भर करती है। चुंबकीय विरूपण-प्रभाव की मात्रा क्षेत्र की दिशा पर निर्भर नहीं करती; कुछ द्रव्यों में क्षेत्र के अनुतीर लंबाइयों में कमी हो जाती है (जैसे निकेल में) और कुछ में वृद्धि (जैसे क्षीण क्षेत्रों के कारण लोहे में)। इस संवृति का उपयोग 100 kHz तक की आवृति वाले पराश्रवनिक दोलन प्राप्त करने में होता है।

सारणी और ग्राफ

पृथ्वी का चुंबकीय क्षेत्र

पृथ्वी चुंबकीय क्षेत्र से आवृत है।

पृथ्वी के जिन बिंदुओं पर चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता की दिशा उदग्र होती है, उन्हें **चुंबकीय ध्रुव** कहते हैं। ऐसे बिंदु पृथ्वी पर दो हैं: उत्तरी चुंबकीय ध्रुव (यहां बल-रेखाओं की दिशाएं नीचे की ओर हैं) और दक्षिणी चुंबकीय ध्रुव (यहां बल-रेखाओं की दिशाएं ऊपर की ओर हैं।) पृथ्वी के चुंबकीय व भौगोलिक ध्रुव संपात नहीं करते; उत्तरी चुंबकीय ध्रुव दक्षिणी गोलार्ध में है, और दक्षिणी चुंबकीय ध्रुव—उत्तरी गोलार्ध में। चुंबकीय ध्रुवों की स्थिति कालांतर में बदलती रहती है।

चुंबकीय ध्रुवों से गुजरने वाली सरल रेखा को पृथ्वी का **चुंबकीय अक्ष** कहते हैं। चुंबकीय अक्ष के अभिलंब तल पर स्थित बड़े वृत्त की परिधि **चुंबकीय विषुवक** कहलाती है। चुंबकीय विषुवक के बिंदुओं पर चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता की दिशाएं क्षैतिज होती हैं। चुंबकीय अक्ष पृथ्वी के अहर्निश घूर्णन के अक्ष के साथ संपात नहीं करता।

चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता चुंबकीय विषुवक पर करीब 27.1 A/m होती है, और चुंबकीय ध्रुवों पर—करीब 52.5 A/m। कुछ स्थलों पर तीव्रता बहुत अधिक होती है; इन स्थलों को चुंबकीय असंगति कहते हैं। चुंबकीय असंगति के कुर्स्काया अंचल (रूसी रिपब्लिक में उक्रैन की सीमा के पास) में तीव्रता ~160 A/m तक है।

चित्र 60. अधिक ऊँचाइयों पर पार्थिव चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता।

सारणी 98. **विद्युतकनीक में प्रयुक्त इस्पातों के गुण**

इस्पात का मार्का	μ_{in}	μ_{max}	H_{c}, A/m	B (2kA/cm पर) T	ρ, 10^{-4} Ω·cm
Э 31	250	5500	43.8	1.46	0.5
Э 41	300	6000	35.8	1.46	0.6
Э 42	400	7500	31.8	1.45	0.6
Э 45	600	10000	19.9	1.46	0.6
Э 310	1000	30000	9.6	1.75	0.5

सारणी 99. **लोहा-निकेल धातुमिश्र के गुण**

धातु मिश्र	μ_{in}	μ_{max}	H_{c}, A/m	M_{s}, MA/m	ρ, 10^{-4}Ω·cm
79HM	20000	100000	2.4	0.64	0.55
80HXC	35000	120000	1.2	0.56	0.62
50HCX	3000	30000	15.9	0.80	0.85
50H	3000	35000	9.55	1.19	0.45
65HII	3000	100000	7.96	1.04	0.35
50HII	2000	20000	15.9	1.19	0.45
Mo-पेर्मएलोय	20000	75000	2.4	0.67	0.55
78.5 Ni-पेर्मएलोय	10000	100000	2.0	0.85	0.16

टिप्पणी :—1. इन मिश्र-धातुओं की चुंबकीय वेधिता बहुत ऊंची होती है और वह अधिक तीव्रता वाले क्षेत्र में व उच्च आवृत्ति के प्रभाव से तेजी के साथ कम होने लगती है। इसके अतिरिक्त वह यांत्रिक प्रतिबल पर भी बहुत निर्भर करती है।

2. प्रतीक देखें पृ. 184-186 पर।

सारणी 100. **ठोस चुंबिक द्रव्यों के गुण**

द्रव्य	H_{c}, kA/m	B_{r}, T	$HB/2$, kJ/m³
इस्पात : EX3	4.8	0.95	1.2
EB6	4.9	1.00	1.3
BX5K5	7.9	0.85	1.8
EX9K15M2	13.5	0.80	2.8
प्लैटिनम-चुंबकीय मिश्रधातु	119-318	0.3-0.6	1-1.5
बेरियम फेराइट	127-231	0.18-0.4	3-15
Alni 1 (AH 1)	19.9	0.7	2.8
Alni 3 (AH 3)	39.8	0.5	3.6
Alnico 12 (AHKO 1)	39.8	0.68	5.5
Alnico 18 (AHKO 3)	51.7	0.9	9.7
Alnisi (AHK)	59.7	0.4	4.3
Magnico (AHKO 4)	39.8	1.23	15.0

टिप्पणी :—इन द्रव्यों का निग्रही बल बहुत अधिक होता है और ये स्थायी चुंबक बनाने के काम आते हैं। इनका एक महत्वपूर्ण लक्षण है—राशि $HB/2$ का अत्यधिक उच्च मान। यह राशि लौहचुंबिकों को आवृत रखने वाले चुंबकीय क्षेत्र की अधिकतम ऊर्जा के साथ समानुपाती होती है।

सारणी 101. **चुंबकीय पारविद्युकों के गुण**

द्रव्य	μ	α, 10^{-6} K^{-1}
प्रेस पेर्म T4-180	160-200	+400
आल-सीफर T4-90	75-85	+400
आल-सीफर T4-60	55-65	—300, —400
आल-सीफर B4-32	30-34	—200, +250
लौह कार्बोनिल	11-14	—50, +50
फेरो-एलास्ट	9-10	—50, +50
आल सीफर P4-6	5-8	—80, —150

टिप्पणी :—चुंबकीय पारविद्युक लौहचुंबिकों के सूक्ष्म कणों (10^{-1}-10^{-4}cm) से बनते हैं, जो पारविद्युक द्वारा परस्पर संबद्ध रहते हैं। इन द्रव्यों का विशिष्ट प्रतिरोध 1 से 400 Ω·cm के परास में होता है; α प्रतिरोध का तापक्रमी गुणांक है।

सारणी 102. फेराइटों के मुख्य गुण

फेराइट	μ_{in}	α, $10^{-6}K^{-1}$	ρ, Ω cm
निकेल-जिंक व लीथियम-जिंक फेराइट			
2000HH	2000	6	10^4-10^7
600HH	600	6	
400HH	400	5	
200HH	200	4-25	
100HH	100	10-30	
50BЧ	50	50	
मैंगनीज-जिंक फेराइट			
4000HM	4000	2	
3000HM	3000	3	10^2
2000HM	2000	0.6-1.5	
1500HM	1500	0.6-1.5	
1000HM	1000	1.5	

टिप्पणी :—फेराइट धातुओं (निकेल, जस्ता, लोहा) के आक्साइडों का मिश्रण है, जिनका विशिष्ट प्रतिरोध विशेष तापीय उपचार द्वारा बढ़ा दिया जाता है। α प्रतिरोध का तापक्रमी गुणांक है।

सारणी 103. पराचुंबिकों व पारचुंबिकों की चुंबकीय वेधिता

पराचुंबिक	$(\mu-1)$, 10^{-6}	पारचुंबिक	$(1-\mu)$, 10^{-6}
नाइट्रोजन	0.013	हाइड्रोजन	0.063
हवा	0.38	बेंजीन	7.5
आक्सीजन	1.9	पानी	9.0
एबोनाइट	14	तांबा	10.3
अलुमीनियम	23	कांच	12.6
टंग्स्टन	176	साधारण नमक (खनिज)	12.6
प्लैटिनम	360	क्वार्ट्स	15.1
द्रव आक्सीजन	3400	बिस्मथ	176

सारणी 104. धातुओं का क्यूरी तापक्रम

द्रव्य	t_C, °C	द्रव्य	t_C, °C
गैडोलीनियम	20	मैग्नेटाइट	585
वेध्य मिश्रधातु (पेर्म=एलोय), 30%	70	लोहा (विद्युविश्लेषण से)	769
होइस्लर मिश्रधातु	200	लोहा, हाइड्रोजन में पनर्द्रवित	774
निकेल	358	कोबाल्ट	1140
वेध्य मिश्रधातु 78%	550		

सारणी 105. धातुओं तथा अर्धचालकों की चुंबकीय प्रवणता (18-20° सें० पर)

द्रव्य	χ_ρ, 10^{-6} cm^3/g	द्रव्य	χ_ρ, 10^{-6} cm^3/g
अलुमीनियम (ब)	0.58	टिन β (ब)	0.03
इंडियम (ब)	—0.11	टेलूरियम (ब)	—2.9
एंटीमनी (ब)	—0.80	तांबा (ब)	—0.86
कैडमियम (ब)	—0.18	पारा (द्र)	—0.17
कैल्शियम (ब)	1.1	मैंगेनीज (β, α)	8.8-9.6
क्रोमियम (ब)	3.6	लीथियम	3.6
चाँदी (ब)	—0.19	वैनेडियम (ब)	1.4
जर्मेनियम	—0.12	सीसा (ब)	—0.12
जस्ता (ब)	—0.14	सेलेनियम (अ)	—0.31
टंगस्टन (ब)	0.28	सोडियम	0.61

टिप्पणी—कोष्ठकों में दिये गये प्रतीक : ब—बहुक्रिस्टलीय, द्र—द्रव, अ—अक्रिस्टलीय, α व β—तदनुरूप रूपांतरण।

लौहचुंबिकों की चुंबकीय वेधिता, प्रेरण, निरावन और विरूपण

(चित्र 61, 62, 63.)

(a)

(b)

चित्र 61. (a) क्षीण क्षेत्रों में लोहे और पेर्म-एलोय की चुंबकीय वेधिता का तीव्रता के साथ संबंध (b) इस्पात और ढलवें लोहे के चुंबकीय प्रेरण की क्षेत्र-तीव्रता पर निर्भरता। (आर्मको लोहा American Rolling Mill Corporation द्वारा प्राप्त लोहा है, जिसमें 1% से भी कम अशुद्धियां होती हैं; पेर्म-एलोय वेधिता रखने वाले मिश्रधातुओं को कहते हैं।—अनु.)

सारणी 106. लौहचुंबिक और फेराइट में प्रेरण व निरावन-हानि

द्रव्य	प्रेरण B (T); H (A/m) के लिये						हानि J/m³
	8	40	160	800	4000	40000	
इस्पात, चद्दरा	0.004	0.04	0.9	1.45	1.65	2.1	250
" नर्म (0.1% C)	0.003	0.03	0.6	1.4	1.7	2.1	500
ढलवां लोहा, तापानुशीतित	—	—	0.06	0.5	0.85	1.4	1000
फेराइट : Mn-Zn	0.008	0.05	0.23	0.36	—	—	—
Ni-Zn	0.0005	0.008	0.01	0.15	0.24	—	—
Mg-Mn	—	0.01	0.2	0.23	—	—	—
30% Ni-Fe	—	—	—	0.25	0.31	—	—
70% Ni-Cu	—	—	—	0.06	0.1	—	—
लोहा (35% Co)	—	—	0.4	1.5	2.1	2.4	350
" चद्दरा (4.3% Si)	0.02	0.45	1.0	1.35	1.53	1.95	69
" तापानुशीतित	0.01	0.075	1.4	1.6	1.72	2.1	60
" विद्युविश्लेषण से प्राप्त	0.004	0.05	1.1	1.5	1.7	2.1	250

टिप्पणी :—1. सांख्यिक मान निकटवर्ती हैं क्योंकि वे नमूने-विशेष पर निर्भर करते हैं।

2. अंतिम स्तंभ 1 पुनर्चुंबकन-चक्र के लिये 1 m³ द्रव्य में हानि दिखाता है (उस स्थिति में, जब निरावन-पाश में प्रेरण का महत्तम मान 0.1T है)।

चित्र 62. नर्म लोहे और कठोरकृत इस्पात ($\approx 1\%$ C युक्त) के लिये चिरावन-पाश।

सारणी *107*. **प्रेरिता का कलन करने के लिए गुणांक k के मान**

लपेटन की लंबाई और उसके व्यास का अनुपात (l/d)	0.1	0.5	1	5	10
k	0.2	0.5	0.6	0.9	~ 1.0
टिप्पणी : — $l/d \geqslant 10$ के लिए $k \approx 1$।					

चित्र 63. चुंबकीय विरूपण में अनुतीय विकृति :
1—54% Pt, 46% Fe; 2—70% Co, 30% Fe; 3—50% Co, 50% Fe; 4—50% Ni, 50% Fe; 5—लोहा; 6—जालित कोबाल्ट; 7—फेराइट 20% Ni, 80% Zn; 8—निकेल। दुर्लभ पार्थिव धातुओं (विरल मृदाओं) व युरेनियम-यौगिकों के लिये $\Delta l/l_0$ करीब 2-3 क्रम अधिक होता है।

D. वैद्युत दोलन और विद्युचुंबकीय तरंग

मूल अवधारणाएं और नियम

1. परिवर्ती धारा

मान या दिशा (या दोनों ही) में कालांतर से बदलते रहने वाली धारा को **परिवर्ती धारा** कहते हैं। सिर्फ मान के अनुसार बदलने वाली धारा को **स्पंदी धारा** कहते हैं। अधिकतर स्थितियों में ज्यावत परिवर्ती धारा प्रयुक्त होती है (चित्र 64)। आवर्ती अज्यावत धारा को ज्यावत परिवर्ती धाराओं के योगफल के रूप में किसी भी कोटि की परिशुद्धता से व्यक्त कर सकते हैं (दे. पृ. 105)।

समय के किसी दिये गये क्षण में परिवर्ती धारा के बल का सांख्यिक मान

चित्र 64. परिवर्ती वोल्टता व धारा में ज्यावत परिवर्तन ($\varphi=0$)।

उसका **क्षणिक मान** कहलाता है, जो संबंध (4.21) द्वारा निर्धारित होता है। ज्यावत परिवर्ती धारा का क्षणिक मान और उसकी तीव्रता (वोल्टता) निम्न सूत्रों से व्यक्त होते हैं :

$$i=I_0 \sin \omega t, \qquad (4.78)$$

$$u=U_0 \sin (\omega t+\varphi), \qquad (4.79)$$

जहां I_0 व U_0 क्रमशः धारा और वोल्टता के महत्तम (आयामी) मान हैं, ω=धारा की चक्रीय आवृत्ति, t=समय, φ=धारा व वोल्टता के बीच का प्रावस्था-अंतर (दे. पृ. 104), $\omega=2\pi f$, f=धारा की आवृत्ति।

परिवर्ती धारा के बल का कारगर मान ऐसे स्थिर धारा-बल का मान है, जो उसी सक्रिय प्रतिरोध पर उतनी ही शक्ति प्रदान करता है, जितनी दी गयी परिवर्ती धारा का बल। ऐंपियरमापी व वोल्टमापी अधिकतर स्थितियों में (पर हमेशा नहीं!) धाराबल I व वोल्टता U का कारगर मान ही बताते हैं।

ज्यावत धाराओं के लिये

$$I=\frac{I_0}{\sqrt{2}}, \; U=\frac{U_0}{\sqrt{2}}. \qquad (4.80)$$

परिपथ में परिवर्ती धारा द्वारा उत्पन्न औसत शक्ति

$$P=UI \cos \varphi. \qquad (4.81)$$

राशि $\cos \varphi$ को **शक्ति-गुणक** कहते हैं।

परिवर्ती धारा की प्रेरिता L परिपथ में लगाये गये प्रतिरोध जैसा काम करती है, अर्थात् परिवर्ती धारा का बल कम करती है। **प्रेरज प्रतिरोध** निम्न सूत्र से निर्धारित होता है :

$$r_L=\omega L. \qquad (4.82)$$

यह प्रतिरोध कुंडली में उपस्थित स्वप्रेरण के विभव से उत्पन्न होता है। यदि **उपकरण** में सिर्फ प्रेरज प्रतिरोध लगा है, तो परिवर्ती धारा उस उपकरण में प्रयुक्त तीव्रता से प्रावस्था के अनुसार 90° पीछे रहती है।

परिवर्ती धारा के परिपथ में लगी धारिता धारा को गुजारती है (स्थिर धारा के साथ यह नहीं होता)। परिवर्ती धारा को धारिता प्रदान करने वाला **प्रतिरोध धारक प्रतिरोध** कहलाता है। धारक प्रतिरोध है :

$$r_C=\frac{1}{\omega C} \qquad (4.83)$$

धारक (संघनक) में धारा प्रयुक्त वोल्टता से 90° आगे रहती है।

सक्रिय प्रतिरोध, प्रेरिता, ग्राहिता व परिवर्ती वोल्टता के स्रोत को शृंखला में जोड़ने पर (चित्र 65 a) परिपथ का पूर्ण प्रतिरोध (impedance) होगा

$$Z=\sqrt{r^2+(r_L-r_C)^2} \qquad (4.84)$$

परिवर्ती वोल्टता के स्रोत के साथ प्रेरिता, धारिता व प्रतिरोध को चित्र 65a की भांति शृंखल क्रम में जोड़ने से प्राप्त परिपथ को **शृंखल अनुनादी आकृति** कहते हैं।

शृंखल अनुनादी आकृति में धारा-बल का आयाम

$$I=\frac{U_0}{Z}=\frac{I_{\text{anu}}}{1+Q^2(\omega/\omega_0-\omega_0/\omega)^2} \qquad (4.85)$$

जहां Q व ω_0 आकृति की उत्कृष्टता और अनुनाद की आवृत्ति है, I_{anu} अनुनाद की स्थिति में धारा की आवृत्ति है (ये तीनों राशियां आगे चल कर सविस्तार समझायी गयी हैं), U_0 व ω बाह्य वोल्टता के आयाम व आवृत्ति है।

धारा व बाह्य वोल्टता के बीच प्रावस्था का अंतर निम्न समीकरण से निर्धारित होता है :

$$\operatorname{tg} \varphi = (r_L - r_C)/r \quad \text{या} \quad \cos \varphi = r/Z. \qquad (4.86)$$

यदि शृंखल अनुनादी आकृति में $r_L = r_C$, तो $\varphi = 0$: पूर्ण प्रतिरोध Z का मान निम्नतम होता है (r के बराबर: दे. चित्र 70), और धारा-बल का आयाम महत्तम मान (I_{anu}) रखता है (जब बाह्य वोल्टता U_0 का मान स्थिर हो)। इस संवृति को **शृंखल वैद्युत अनुनाद** (या **वोल्टता का अनुनाद**) कहते हैं।

वोल्टताओं के अनुनाद में प्रेरिता व संघनक पर वोल्टताओं के आयाम समान होते है, पर इन वोल्टताओं (u_L व u_C) के क्षणिक मान प्रावस्था की दृष्टि से परस्पर विपरीत होते हैं।

अनुनाद की स्थिति में संघनक पर वोल्टता के आयाम U_C व बाह्य परिवर्ती वोल्टता के आयाम U_0 का अनुपात आकृति की **उत्कृष्टता** Q कहलाता है। यदि $r/(2L) \ll \omega_0$, तो $Q = \omega_0 L/r = 1/(\omega_0 Cr)$: ω_0 अनुनादी आवृत्ति है, जो परिस्थिति $r_L = r_C$ द्वारा निर्धारित होती है।

अनुनाद में (यदि $Q > 1$) संघनक व प्रेरिता पर वोल्टताओं के आयाम बाह्य वोल्टता के आयाम से बहुत अधिक होते है, क्योंकि $U_L = U_C = QU_0$.

चित्र 65. शृंखल (a) और समांतर व अनुनादी (b) आकृतियां।

धारिता C, प्रेरिता L व सक्रिय प्रतिरोध r को परिवर्ती वोल्टता के स्रोत के साथ समांतर क्रम में जोड़ा जा सकता है (चित्र 65b)। इस प्रकार से जोड़ी गयी आकृति LCr को **समांतर अनुनादी आकृति** कहते हैं। चित्र 65b

में दिखायी गयी समांतर अनुनादी आकृति का पूर्ण प्रतिरोध निम्न समीकरण द्वारा निर्धारित होता है :

$$\frac{1}{Z^2} = \frac{1}{r^2} + \left(\frac{1}{r_L} - \frac{1}{r_C}\right)^2, \qquad (4.87)$$

और पूरे परिपथ में वोल्टता u व धारा i के बीच प्रावस्था-अंतर — निम्न समीकरण से :

$$\operatorname{tg} \varphi = r\left(\frac{1}{r_L} - \frac{1}{r_C}\right). \qquad (4.88)$$

प्रावस्था-अंतर $\varphi = 0$ होगा, यदि $r_L = r_C$; इस संवृति को **समांतर वैद्युत अनुनाद** (या **धारा का अनुनाद**) कहते है। समांतर अनुनाद में पूर्ण प्रतिरोध Z का मान महत्तम होता है (Z_{max}), पूरे परिपथ में धारा-बल का आयाम I निम्नतम मान (I'_{anu}) रखता है, संघनक व प्रेरिता में धारा-बलों I_C व I_L के आयाम बराबर होते हैं, पर धारा i_C व i_L के क्षणिक मान प्रावस्था की दृष्टि से विपरीत होते है। समांतर अनुनादी आकृति की उत्कृष्टता $Q = I_C / I'_{anu} = I_L / I'_{anu}$; यदि $Q > 1$, तो अनुनाद की स्थिति में शाखा L व C के धारा-बलों के आयाम पूर्ण धारा I'_{anu} के आयाम से अधिक होंगे। आदर्श समांतर आकृति (दे. चित्र 65b) में ω/ω_0 पर अनुपात I'_{anu}/I की निर्भरता वैसी ही होती है, जैसी शृंखल अनुनादी आकृति में I/I_{anu} की (दे. चित्र 72); ω_0 अनुनाद की आवृत्ति है, जो परिस्थिति $r_L = r_C$ द्वारा निर्धारित होती है।

समांतर आकृति का सही हिसाब लगाने के लिए परिपथ में सक्रिय प्रतिरोध के L व C को ध्यान में रखना चाहिये। प्रेरिता व धारिता में सक्रिय हानि की स्थिति में ω/ω_0 पर अनुपात Z/Z_{max} की निर्भरता चित्र 71 के ग्राफ में दिखायी गयी है।

परिवर्ती धारायुक्त चालक में प्रेरित धारा उत्पन्न होती है, जिसके कारण चालक की सतह पर धारा का घनत्व अधिक हो जाता है, बनिस्बत कि उसके बीच में। उच्च आवृतियों पर चालक के अक्ष के पास धारा का घनत्व व्यावहारिकत: शून्य हो जा सकता है। इस संवृति को **सतह-प्रभाव** (या **त्वचीय प्रभाव**) कहते हैं।

2. दोलक आकृति

वैद्युत राशियों (आवेश, धारा-बल, वोल्टता) में सीमित परिवर्तन, जो किसी औसत मान के सापेक्ष पूर्णतः या अंशतः दुहराते रहते है, **वैद्युत दोलन** कहलाते है। परिवर्ती वैद्युत धारा विद्युत-दोलन का ही एक प्रकार है।

उच्च आवृत्ति के वैद्युत दोलन अधिकतर स्थितियों में दोलक आकृति की सहायता से प्राप्त होते हैं।

दोलक आकृति एक संवृत परिपथ है, जिसमें प्रेरिता L और धारिता C होती है।

आकृति के नैसर्गिक या स्वतंत्र दोलन का आवर्त काल

$$T=2\pi\sqrt{LC} \qquad (4.89)$$

इस संबंध को **टाम्सन का सूत्र** कहते हैं। यह तब लागू होता है, जब ऊर्जा की हानि नहीं होती। आकृति में ऊर्जा-हानी होने पर (जैसे सक्रिय प्रतिरोध r के कारण) आकृति का स्वतंत्र दोलन नश्वर होता है और

$$T=\frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC}-\left(\frac{r}{2L}\right)^2}} \qquad (4.90)$$

तथा आकृति में धारा नश्वर दोलन के नियम के अनुसार बदलती रहती है :

$$i=I_0e^{-\frac{r}{2L}t}\sin\omega t \qquad (4.91)$$

नश्वर दोलनों का ग्राफ पृ. 108 पर (चित्र 26) देखें।

दोलक आकृति पर परिवर्ती विवाव के प्रभाव से आकृति में **आरोपित दोलन** उत्पन्न होते हैं। L, C, r के मान स्थिर होने पर धारा के आरोपित दोलनों का आयाम आकृति के दोलनों की निजी आवृत्ति और ज्यावत विवाव के परिवर्तन की आवृत्ति के अनुपात पर निर्भर करता है (दे. चित्र 72)।

3. विद्युचुंबकीय क्षेत्र

बियो-सावार्ट-लैप्लेस के नियमानुसार (दे. पृ. 178) धारायुक्त चालक के गिर्द संवृत बल-रेखाओं वाला चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न होता है। ऐसे क्षेत्र को **भंवरी** कहते है। जिस चालक में परिवर्ती धारा बहती है, उसके गिर्द परिवर्ती चुंबकीय क्षेत्र बनता है।

परिवर्ती धारा संघनक से गुजरती है (दे. पृ. 197, स्थिर धारा नही गुजरती); पर यह धारा चालकता की धारा नहीं होती; इसे **स्थानांतरण-धारा** कहते है। स्थानांतरण-धारा कालांतर से बदलने वाला विद्युत-क्षेत्र है: वह चालकता की परिवर्ती धारा जैसा परिवर्ती चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करती है। स्थानांतरण-धारा का घनत्व

$$j=\frac{\Delta D}{\Delta t}, \qquad (4.92)$$

जहां D = वैद्युत क्षेत्र का स्थानांतरण।

कालांतर से वैद्युत क्षेत्र के स्थानांतरण में परिवर्तन के कारण व्योम के प्रत्येक बिंदु पर परिवर्ती भंवरी चुंबकीय क्षेत्र बनता है (चित्र 66a)। उत्पन्न चुंबकीय क्षेत्र के सदिश **B** सदिश **D** के लंबवत समतलों पर होते हैं। इस नियमसंगति को व्यक्त करने वाला गणितीय सूत्र **मैक्सवेल का प्रथम समीकरण** कहलाता है।

चित्र 66. वैद्युत क्षेत्र के स्थानांतरण में परिवर्तन से चुंबकीय क्षेत्र की उत्पत्ति (मैक्सवेल का प्रथम समीकरण), (b) चुंबकीय प्रेरण में परिवर्तन से भंवरी वैद्युत क्षेत्र की उत्पत्ति (मैक्सवेल का दूसरा समीकरण)।

विद्युचुंबकीय प्रेरण के कारण संवृत बल-रेखाओं वाला वैद्युत क्षेत्र (भंवरी क्षेत्र) उत्पन्न होता है, जो प्रेरण के विवाव (दे. पृ. 181) के रूप में प्रकट होता है। वैद्युत क्षेत्र के प्रेरण में समय के अनुसार परिवर्तनों के कारण व्योम के हर बिंदु पर भंवरी विद्युत-क्षेत्र उत्पन्न होता है (चित्र 66b)। उत्पन्न विद्युत-क्षेत्र के सदिश **D** सदिश **B** के अभिलंबी तलों पर होते है। इस नियम-संगति को व्यक्त करने वाला गणितीय समीकरण **मैक्सवेल का दूसरा समीकरण** कहलाता है।

एक-दूसरे से अटूट वैद्युत व चुंबकीय क्षेत्र मिल-जुल कर **विद्युचुंबकीय क्षेत्र** कहलाते हैं।

चित्र 67. विद्युचुंबकीय तरंग में सदिश **E**, **H** व **S** की पारस्परिक स्थितियां।

मैक्सवेल के समीकरणों से निष्कर्ष निकलता है कि वैद्युत (या चुंबकीय) क्षेत्र में समय के अनुसार होने वाले सभी परिवर्तन एक बिंदु से दूसरे बिंदु पर प्रसारित होते रहते हैं। इस प्रक्रिया में वैद्युत व चुंबकीय क्षेत्रों का परस्पर रूपांतरण होता रहता है। विद्युचुंबकीय तरंग परिवर्तनशील वैद्युत व चुंबकीय क्षेत्रों का व्योम में परस्पर संबद्ध प्रसरण है। असीम व्योम में प्रसरण करती विद्युचुंबकीय तरंग में वैद्युत व चुंबकीय क्षेत्रों की तीव्रताओं के सदिश (**E** व **H**) परस्पर लंब होते हैं, और प्रसरण की दिशा सदिश **E** व **H** के तल के साथ लंब होती है (चित्र 67)।

निर्वात में विद्युचुंबकीय तरंगों के प्रसरण का वेग तरंग-लंबाई पर निर्भर नहीं करता और उसका मान होता है

$$c = 2.997925 \cdot 10^8 \text{m/s}.$$

विभिन्न माध्यमों में विद्युचुंबकीय (संक्षेप में विचु—अनु.) तरंगों के वेग निर्वात में उसके वेग से कम होते हैं :

$$c_1 = \frac{c}{n}, \qquad (4.93)$$

जहां n=माध्यम का अपवर्तनांक (दे. पृ. 213)।

विचु तरंगें ऊर्जा वहन करती हैं।

विकिरण-प्रवाह का तलीय घनत्व **S** एक ऐसी राशि है, जिसका मापांक तरंग द्वारा प्रसरण की दिशा के लंब स्थित तल के इकाई क्षेत्रफल से इकाई समय में वहन की जाने वाली ऊर्जा के बराबर होता है :

$$\mathbf{S} = [\mathbf{EH}]. \qquad (4.94)$$

सदिश **S** को प्वाइंटिंग सदिश कहते हैं ; उसकी दिशा तरंग-प्रसार की दिशा के साथ लंब होती है।

4. विद्युचुंबकीय तरंगों का उत्सर्जन

त्वरण के साथ गतिमान आविष्ट कण विचु तरंगों को उत्सर्जित करते हैं। द्विध्रुव (दे. पृ. 134), जिसके आवेशों की परस्पर दूरी संनादी नियम $l_0 \cos \omega t$ के अनुसार बदलती है, विचु तरंग उत्सर्जित करते हैं, जिनका विकिरण-प्रवाह है

$$\phi_d = Q^2 \omega^4 \bar{l_0}^2 / (12 \pi \varepsilon_0 c^3), \qquad (4.95)$$

जहां Q=द्विध्रुव का आवेश, ε_0=वैद्युत स्थिरांक, ω=चक्रीय आवृत्ति, c= निर्वात में तरंग-वेग। ϕ_d इकाई समय में उत्सर्जित ऊर्जा के औसत मान के बराबर की एक राशि है।

विचु तरंगों का उत्सर्जन हर ऐसा चालक करता है, जिसमें परिवर्ती धारा बहती है। उत्सर्जन सबसे अधिक कारगर तब होता है, जब उत्सर्जक के माप विकिरण-तरंगों की लंबाइयों के साथ तुलनीय होते हैं। विचु तरंगों को कारगर ढंग से उत्सर्जित (या ग्रहण) करने वाला चालक एंटेना या **एरियल** कहलाता है।

धारा का मूल $i\Delta l$, जिसमें धारा-बल संनादी नियम $i = I_0 \cos \omega t$ के अनुसार बदलता है, विचु क्षेत्र उत्सर्जित करता है, जिसमें वैद्युत व चुंबकीय क्षेत्रों की तीव्रताएं क्रमश:

$$E_\theta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \cdot I_0 \frac{\Delta l}{\lambda r} \sin \theta \cos (\omega t - kr) \qquad (4.96)$$

और

$$H_\theta = \frac{1}{2} I_0 \frac{\Delta l}{\lambda r} \sin \theta \cos (\omega t - kr) \qquad (4.97)$$

होती हैं, जहां θ धारा-मूल $i\Delta l$ व प्रेक्षण-बिंदु को मिलाने वाली सरल रेखा, और चालक में धारा की दिशा के बीच का कोण है, $k = 2\pi/\lambda$=तरंग-

चित्र 68. धारा-मूल द्वारा वैद्युत व चुंबकीय क्षेत्रों की तीव्रताओं का कलन।

संख्या, λ=तरंग की लंबाई, r=धारा-मूल व बिंदु A की आपसी दूरी, जिस पर तीव्रता मापी जा रही है; साथ ही : $r \gg \lambda$, $r \gg \Delta l$ (चित्र 68)।

धारा-मूल $i\Delta l$ द्वारा उत्पन्न विकिरण-प्रवाह ϕ_1 निम्न सूत्र द्वारा कलित होता है :

$$\phi_1 = \frac{2\pi}{3}\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}\left(\frac{i\Delta l}{\lambda}\right)^2 \qquad (4.98)$$

सारणी और ग्राफ

स्थिर व परिवर्ती धाराओं के लिए प्रतिरोध

परिवर्ती व स्थिर धाराओं के विरुद्ध प्रतिरोधों का अनुपात परामितक ξ पर निर्भर करता है

$$\xi = 0.14d\sqrt{\frac{\mu f}{\rho}},$$

जहां d=चालक का व्यास (cm में), f=आवृत्ति (Hz में), ρ=विशिष्ट प्रतिरोध ($\Omega \cdot$cm में), μ=चुंबकीय वेधिता।

चित्र 69. परामितक ξ पर परिवर्ती व स्थिर धाराओं पर प्रतिरोधों के अनुपात की निर्भरता।

आवृत्ति पर प्रेरज, धारक व पूर्ण प्रतिरोधों की निर्भरता

चित्र 70. शृंखल अनुनादी आकृति में प्रेरज, धारक व पूर्ण प्रतिरोधों में आवृत्ति के साथ होने वाले परिवर्तन।

चित्र 71. समांतर अनुनादी आकृति में आवृत्ति पर पूर्ण प्रतिरोध Z की निर्भरता। अक्षों पर सापेक्षिक मान Z/Z_{max} व ω/ω_0 लिये गये हैं। कलन उस स्थिति के लिये है, जब L व C शाखाओं में सक्रिय प्रतिरोध समान हों।

शृंखल अनुनादी आकृति में आवृत्ति पर धारा-बल की निर्भरता

चित्र 72. शृंखल अनुनादी आकृति में आवृति पर धारा-बल की निर्भरता।

सारणी 108. **तांबे के तार में उच्चावृत्ति वाली धारा की वेधन-गहनता** σ

आवृति, MHz	0.01	0.1	1	10	100
σ, mm	0.65	0.21	0.065	0.021	0.006

टिप्पणी :—1. अन्य आवृतियों तथा अन्य द्रव्यों के लिये σ का मान निम्न सूत्र द्वारा ज्ञात हो सकता है :

$$\sigma = 5033\sqrt{\rho/(\mu' f)},$$

जहां σ—वेधन की गहराई (cm), ρ—विशिष्ट प्रतिरोध (Ω·cm), μ—द्रव्य की चुंबकीय वेधिता, f—आवृति (Hz)।

2. **वेधन-गहनता** (वेधन की गहराई) तार की सतह से उस दूरी को कहते है, जहां (सतह की तुलना में) धारा का घनत्व e गुना कम होता है; e—प्राकृतिक लघुगणक का आधार ($e \approx 2.72$) है।

सारणी 109. **विद्युचुंबकीय विकिरण का पैमाना**

तरंग-लंबाई		आवृति (Hz)	परास	तरंगों (या आवृतियों) के रूप	प्राप्ति की मुख्य विधियां और उपयोग
10^8 km	10^{13}	3×10^{-3}	अल्प-आवृति की तरंगें	अवाल्प आवृति	विशेष संरचना के जनित्र
				अल्प आवृतियां	
10^6 km	10^{11}	3×10^{-1}		औद्योगिक आवृतियां	परिवर्ती धारा के जनित्र (परिवर्तक); अधिकतर वैद्युत उपकरण व जनित्र 50-60 Hz वाली परिवर्ती धारा का उपयोग करते है
10^5 km	10^{10}				
10^3 km	10^8	3×10^2		स्वनिक आवृतियां	स्वनावृति-जनित्र; उपयोग—विद्युत्स्वन (माइक्रोफोन, लाउड-स्पीकर), सिनेमा, रेडियो-प्रसारण में
1 km	10^5	3×10^5	रेडियो-तरंगें	दीर्घ	भिन्न संरचनाओं के विद्युदोलक जनित्र; उपयोग—टेलीग्राफ, रेडियो-प्रसारण, टेलीविजन, रेडियो-लोकेशन में
				मध्यम	
				लघु	
1 m	10^2	3×10^8		मीटर	उपयोग—द्रव्य के गुणों के अध्ययन में
1 dm	10	3×10^9		डेसीमीटर	

(सारणी 109 का शेष)

तरंग-लंबाई	आवृति (Hz)	परास	तरंगों (या आवृतियों) के ग्रुप	प्राप्ति की मुख्य विधियां और उपयोग
1cm — 1	3×10^{10}	रेडियो-तरंगें	सेंटीमीटर	मैग्नेट्रोन- व क्लिस्ट्रोन-जनित्रों और मेसर (maser) द्वारा उत्पन्न; उपयोग—रडार, सूक्ष्मतरंगी स्पेक्ट्रमदर्शी और रेडियो-ज्योतिविज्ञान में
			मिलिमीटर	
1mm — 10^{-1}	3×10^{11}		मध्यवर्ती	
		अवरक्त किरणें	डेका-माइक्रोन	तप्त पिंडों (आर्क व गैसीय निराविष्टक बल्बों आदि) से विकरणित; उपयोग—अवरक्त स्पेक्ट्रमदर्शी व अंधेरे में फोटोग्राफी के लिये (अवरक्त किरणों में)
1μm — 10^{-4}	3×10^{14}		माइक्रोन	
		प्रकाश-किरणें		
		पराबैंगनी	निकट	सूर्य, पारद-वाष्प बल्ब आदि के विकिरण से; उपयोग—पराबैंगनी सूक्ष्मदर्शी, प्रदीप्ति बल्ब और चिकित्सा में
1nm — 10^{-7}	3×10^{17}		दूर	
1Å — 10^{-8}	3×10^{18}	एक्स-रे	परानर्म	एक्स-रे-नली व अन्य उपकरणों से उत्पन्न होती है, जिनमें 1 keV ऊर्जा वाले एलेक्ट्रोन मंदित होते हैं; उपयोग—निदान के लिये (चिकित्सा में), द्रव्य की रचना के अध्ययन में, त्रुटि-खोज (flaw detection) में
			नर्म	
			कठोर	

(सारणी 109 का शेष)

तरंग-लंबाई	आवृति (Hz)	परास	तरंगों (या आवृतियों) के ग्रुप	प्राप्ति की मुख्य विधियां और उपयोग
1X — 10^{-11}	3×10^{21}	गामा-किरणें		नाभिकों के रश्मि सक्रिय क्षय में, 0.1 MeV वाले एलेक्ट्रोन के मंदन से तथा अन्य प्राथमिक कणों की व्यतिक्रिया से उत्पन्न होती है; उपयोग—गामा त्रुटि-खोज व द्रव्य के गुणों के अध्ययन में

टिप्पणी :—सारणी में लघुगणकी पैमाना दिया गया है। प्रथम स्तंभ में तरंग की लंबाइयां है (दायें cm में और बायीं ओर लंबाई की अन्य इकाइयों में), स्तंभ 2 में—आवृति (Hz में), स्तंभ 3 में—परासों के नाम, स्तंभ 4 में—आवृतियों (या तरंगों) के ग्रुपों के नाम, स्तंभ 5 में—विद्युचुंबकीय दोलनों को प्राप्त करने की मुख्य विधियां और उनके उपयोग।

अल्पावृत्ति वाली व रेडियो तरंगों की आवृति सबसे कम होती है; ये तरंग विभिन्न कृत्रिम दोलकों द्वारा विकिरणित होती हैं।

अवरक्त विकिरण मुख्यतः परमाणुओं या अणुओं के दोलन से प्राप्त होती है।

प्रकाश तरंगें या पराबैंगनी विकिरण अणुओं या परमाणुओं में बाह्य अभ्रों के एलेक्ट्रोन की अवस्था-परिवर्तन से प्राप्त होती है (दे. पृ. 250)।

एक्स-किरणें परमाणु के आंतरिक अभ्र में एलेक्ट्रोन की अवस्था-परिवर्तन (**लक्षक विकिरण**) से, या एलेक्ट्रोन अथवा अन्य आविष्ट कण का तेजी से मंदन करने से प्राप्त होती है।

गामा किरणें नाभिकों के उद्दीपन तथा अन्य प्राथमिक कणों की व्यतिक्रिया से प्राप्त होती हैं।

कुछ प्रकार की तरंगों के बारे में सूचनाएं अगले अध्याय ("प्रकाशिकी") में मिलेंगी।

प्रकाशिकी

मूल अवधारणाएं और नियम

प्रकाशिकीय विकिरण (प्रकाश) 0.01 nm से 1 cm की तरंग-लंबाइयों वाला विद्युचुंबकीय विकिरण है। ऐसी तरंगों का स्रोत परमाणु व अणु होते हैं, जिनमें एलेक्ट्रोनों की ऊर्जीय अवस्था में परिवर्तन होता है (दे. पृ. 248)। प्रकाशिकीय विकिरण में **दृश्य विकिरण** का पराम विशिष्ट है, जिसमें 400 से 760 nm की लंबाइयों वाली तरंगें आती हैं।

1. ऊर्जीय और प्रकाशीय राशियां. प्रकाशमिति

विकिरण-ऊर्जा यह किसी पिंड या माध्यम द्वारा उत्सर्जित फोटोनों (दे. पृ. 227) या विद्युचुंबकीय तरंगों (दे. पृ. 203) की ऊर्जा है। मनोवांछित तल से विद्यु तरंगों द्वारा इकाई समय में वहन की जाने वाली ऊर्जा के औसत मान को **विकिरण-प्रवाह** कहते हैं। मानवीय आंख पर अपने प्रभाव के अनुसार मूल्यांकित विकिरण-प्रवाह **ज्योति-प्रवाह** कहलाता है।

विकिरण प्रवाहों के ऊर्जीय लक्षक. विकिरण-प्रवाह ϕ_e और इस विकिरण के प्रसरण के व्योम कोण Ω के अनुपात को **प्रकाश की ऊर्जीय तीव्रता (विकिरण-तीव्रता)** कहते हैं :

$$I_e = \phi_e/\Omega, \tag{5.1}$$

इसकी इकाई है वाट प्रति स्टेरेडियन (W/sr)।

ऊर्जीय प्रकाशिता विकिरण-प्रवाह ϕ_e और उसके द्वारा समरूपता से प्रकाशित सतह के क्षेत्रफल S के अनुपात को कहते हैं :

$$E_e = \phi_e/S; \tag{5.2}$$

इकाई — वाट प्रति वर्ग मीटर (W/m^2)।

ऊर्जीय प्रदीप्ति विकिरण-प्रवाह ϕ_e और विकिरणकारी सतह के क्षेत्रफल S_s के अनुपात को कहते हैं :

$$R_e = \phi_e/S_s; \tag{5.3}$$

इकाई — वाट प्रति वर्ग मीटर (W/m^2)।

विकिरण-प्रवाह के प्रकाशीय लक्षक. भिन्न तरंग-लंबाइयों वाले प्रवाह के प्रति आंखें समान रूप से संवेदनशील नहीं होतीं। दिन के प्रकाश में आंखें ज्यादातर 555 nm तरंग-लंबाई वाले प्रकाश के प्रति सबसे अधिक संवेदनशील होती हैं। 555 nm तरंग-लंबाई वाले विकिरण-प्रवाह ϕ_{555} और λ तरंग-लंबाई वाले विकिरण-प्रवाह ϕ_λ के अनुपात को **आंखों की सापेक्षिक स्पेक्ट्रमी संवेदनशीलता या सापेक्षिक दृश्यमानता** (सापेक्षिक प्रदीप्ति-क्षमता, K_λ) कहते हैं : $K_\lambda = \phi_{555}/\phi_\lambda$। λ पर K_λ की निर्भरता के ग्राफ को सापेक्षिक स्पेक्ट्रमी संवेदनशीलता का वक्र कहते हैं। झुटपुटे प्रकाश में आंख सबसे अधिक 507 nm तरंग-लंबाई वाले प्रकाश के प्रति संवेदनशील होती है। दिन के प्रकाश में 1 W विकिरण-प्रवाह 680 lm (ल्युमेन, दे. आगे) ज्योति-प्रवाह के अनुरूप होता है; झुटपुटे प्रकाश में 507 nm तरंग-लंबाई वाला 1 W विकिरण-प्रवाह 1745 lm के अनुरूप होता है।

प्रेक्षक से दूरी की तुलना में नगण्य रैखिक मापों वाले स्रोत को **बिंदु-स्रोत** कहते हैं।

ज्योति-प्रवाह की प्रकाश-शक्ति नापने के लिए कैंडेला (cd) नामक इकाई प्रयुक्त होती है। **कैंडेला** *ऐसी प्रकाश-शक्ति को कहते हैं, जो पूर्ण विकिरक* (दे. पृ. 231) *की 1/600000 m^2 सतह द्वारा लंब दिशा में उत्सर्जित होती है;* यहां विकिरक का तापक्रम प्लैटिनम के जमनांक के बराबर (2042 K) है और दाब 101 325 Pa है। कैंडेला की गिनती अ. प्र. की मूल इकाइयों में होती है; इसे निर्धारित करने के लिए विशेष बनावट का मानक तैयार किया गया है।

ज्योति-प्रवाह बिंदु-स्रोत की प्रकाश-शक्ति I और व्योम कोण Ω के गुणनफल के बराबर की राशि को कहते हैं : $\phi = I\Omega$।

ज्योति-प्रवाह की इकाई ल्युमेन (lm) है। **ल्युमेन** ऐसे ज्योति-प्रवाह को कहते हैं, जो 1 cd प्रकाश-शक्ति के बिंदु-स्रोत द्वारा 1 sr के व्योम कोण में उत्सर्जित होता है। बिंदु-स्रोत द्वारा उत्सर्जित कुल ज्योति-प्रवाह

$$\phi_p = 4\pi I. \tag{5.4}$$

सारणी 60. **हवा की सापेक्षिक आर्द्रता की शीतमापीय सारणी**

शुष्क बल्ब वाले थर्मामीटर का पठन, °C	शुष्क व नम बल्ब वाले थर्मामीटरों के पठनों में अन्तर, °C										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	100	81	63	45	28	11	—	—	—	—	—
2	100	84	68	51	35	20	—	—	—	—	—
4	100	85	70	56	42	28	14	—	—	—	—
6	100	86	73	60	47	35	23	10	—	—	—
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7	—	—
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	4	—
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	—
14	100	90	79	70	60	51	42	33	25	17	9
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
18	100	91	82	73	64	56	48	41	34	26	20
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
26	100	92	85	78	71	64	58	50	45	40	34
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

टिप्पणी :—सापेक्षिक आर्द्रता **शीतमापी** (psychrometer) की सहायता से ज्ञात करते हैं; यह दो थर्मामीटरों से बना होता है, जिसमें से एक की घुंडी सूखी रहती है और दूसरे की भीगे कपड़े से लपेटी रहती है। सारणी 60 की सहायता से सापेक्षिक आर्द्रता ज्ञात करने के लिए सूखे व नम थर्मामीटरों के दिए गये पठनांतर वाले स्तंभ व सूखे थर्मामीटर के पठन वाली पंक्ति के कटान बिन्दु पर स्थित संख्या को खोजते हैं।

यांत्रिक दोलन और तरंगें

मूल अवधारणाएं और नियम

1. संनादी दोलन

किसी मध्यवर्ती स्थिति (जैसे स्थायी संतुलन की स्थिति) के आस-पास अपने को दुहराते रहने वाली सीमित गति (या सीमित अवस्था-परिवर्तन) **दोलन-गति** (या सिर्फ दोलन) कहलाती है।

दोलन करने वाले व्यूह **दोलक व्यूह** कहलाते हैं। सिर्फ यांत्रिक राशियों (जैसे स्थानांतरण, वेग, त्वरण, दाब आदि) से लंछित होने वाले दोलन **यांत्रिक दोलन** कहलाते हैं।

आवर्ती (मीआदी) **दोलन** ऐसे दोलनों को कहते हैं, जिसमें परिवर्तनशील राशि अपना प्रत्येक मान असीम संख्या बार समान कालांतरों पर दुहराती रहती है। समय का सबसे छोटा अंतराल T, जिसके बीतने पर परिवर्तनशील राशि का प्रत्येक मान दुहराता रहता है, **दोलन-काल** (या **दोलन का आवर्त-काल**) कहलाता है।

राशि $\nu = \frac{1}{T}$ को आवर्ती दोलनों की **आवृत्ति (बारंबारता)** कहते हैं। आवृत्ति ν को हर्ट्स (Hz) में व्यक्त करते हैं। 1 Hz ऐसे आवर्ती दोलनों की आवृत्ति है, जिसका आवर्तकाल 1s है।

संनादी दोलन किसी राशि में होने वाले ऐसे परिवर्तन को कहते हैं, जिसे ज्यावत (या **कोज्यावत**) **नियम** द्वारा निरूपित किया जा सकता है :

$$u = A \sin(\omega t + \varphi), \qquad (3.1)$$

जहां A=परिवर्तनशील राशि का अधिकतम मान (मापांक में) है; इसे **संनादी दोलनों का आयाम** कहते हैं। $\omega t + \varphi$ को संनादी दोलन **की प्रावस्था** कहते हैं; φ=**आरंभिक प्रावस्था**, ω=**कोणिक** या **चक्रीय आवृत्ति**। चक्रीय आवृत्ति ω और दोलनों की आवृत्ति ν निम्न सूत्र द्वारा बंधे हैं ;

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu. \qquad (3.2)$$

संनादी दोलन की प्रावस्था समय के दिये हुए क्षण पर इकाई आयाम वाली परिवर्तनशील राशि का मान निर्धारित करती है। प्रावस्था कोणिक इकाइयों (रेडियन या डिग्री) में व्यक्त होती है।

कोणिक या चक्रीय आवृत्ति रेडियन प्रति सेकेंड (rad/s) में व्यक्त की जाती है।

संनादी दोलन का एक उदाहरण है वृत्त की परिधि पर समरूप कोणिक वेग ω से वलनरत गोली के प्रक्षेप की गति (चित्र 25)। गोली की स्थितियों 1 व 2 के अनुरूप x-अक्ष पर उसके प्रक्षेपों के **विचलन** (संतुलन-बिंदु 0 से प्रक्षेपों के स्थानांतरण) हैं :

$$u_1 = R \sin \alpha = R \sin \omega t,$$
$$u_2 = R \sin (\alpha + \varphi) = R \sin (\omega t + \varphi).$$

समान आवृत्ति, पर भिन्न आरंभिक प्रावस्था वाले दोलन को **प्रावस्थांतरित दोलन** कहते हैं। **प्रावस्था-अन्तर** आरंभिक प्रावस्थाओं के अंतर को कहते हैं। समान आवृत्ति वाले दो दोलनों की प्रावस्थाओं का अंतर समय मापने के लिये आरंभिक क्षण के चयन पर निर्भर नहीं करता। उदाहरणार्थ, यदि चित्र 25 में 1 व 2 दो गोलियों की स्थितियां हैं, तो समय

चित्र 25. वृत्ताकार पथ पर वलनरत बिंदु के प्रक्षेप का संनादी दोलन।

मापने के लिये कोई भी आरंभिक क्षण क्यों न चुना जाये, गोलियों के प्रक्षेपों के लिये प्रावस्थांतर हमेशा φ रहेगा (यदि गोलियों की आवृत्तियां समान हैं)।

पिंड का संनादी-दोलन उस पर प्रत्यास्थकल्प बल की क्रिया के कारण उत्पन्न होता है। **प्रत्यास्थकल्प बल** (या प्रत्यास्थप्राय बल) ऐसे बल को कहते हैं, जो अपनी प्रकृति के अनुसार प्रत्यास्थी बल नहीं है, पर उसकी मात्रा संतुलन की स्थिति से पिंड के स्थानांतरण की समानुपाती होती है। ये बल सदा संतुलन की स्थिति की ओर निर्दिष्ट होते हैं। प्रत्यास्थकल्प बल की गणितीय अभिव्यक्ति का रूप है

$$\mathbf{F} = -k\mathbf{u}, \qquad (3.3)$$

जहां k अनुपातिकता का गुणांक है, जिसे प्रत्यास्थकल्प बल का गुणांक कहते हैं, u=स्थानांतरण है; ऋण चिह्न दिखाता है कि बल व स्थानांतरण के सदिशों की दिशाएं विपरीत हैं।

किसी भी प्रकार के आवर्ती दोलन को किसी भी परिशुद्धता-कोटि के साथ संनादी दोलनों के योगफल के रूप में व्यक्त किया जा सकता है।*

* गणितीय विश्लेषण में सिद्ध किया जाता है कि कोई भी आवर्ती दोलन संनादी दोलनों के अनंत योगफल के रूप में, अर्थात् तथाकथित संनादी (हार्मोनिक) क्रम के रूप में व्यक्त किया जा सकता है।

2. दोलक

भौतिक दोलक हर उस लटकाये गये पिंड को कहते है, जिसमें गुरुत्व-केंद्र लटकन बिंदु से नीचे होता है। इस प्रकार से लटकाये गये पिंड में दोलन करने की क्षमता होती है।

दोलन को **बिंदु-** (या **गणितीय**) **दोलक** कहते हैं, यदि दोलनरत पिंड का सारा द्रव्यमान एक बिंदु पर संकेंद्रित माना जा सकता है। गणितीय दोलक का निकटतम साकार रूप मिल सकता है, यदि निम्न शर्तें पूरी की जा सकें: धागा लमड़नशील नहीं हो, हवा के साथ व लटकन-बिंदु पर घर्षण नगण्य हो और धागे की लंबाई की तुलना में पिंड बहुत छोटा हो। विचलन-कोण अत्यल्प होने पर गणितीय दोलक का दोलन संनादी माना जा सकता है। नीचे दिये गये सभी सूत्र ऐसे ही दोलनों के लिये हैं।

गणितीय दोलक का आवर्त-काल :

$$T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \qquad (3.4)$$

जहां l=दोलक की लंबाई, g=स्वतंत्र अभिपातन का त्वरण।

स्प्रिंग से लटके बोझ का दोलन संनादी माना जा सकता है, यदि दोलन का आयाम हूक-नियम के लागू होने की सीमा में है (दे. पृ. 44) और घर्षण-बल पर्याप्त कम हैं। बोझ का दोलन-काल (स्प्रिंग का द्रव्यमान $M \ll m$):

$$T=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}, \qquad (3.5)$$

जहां m=बोझ का द्रव्यमान, k=स्प्रिंग का कड़ापन; सांख्यिक रूप से यह स्प्रिंग को इकाई लंबाई अधिक लमड़ाने के लिये आवश्यक बल की मात्रा है।*

स्प्रिंग के प्रभाव से घूर्णन-दोलन की गति में रत पिंड को **मरोड़ी दोलक** कहते हैं (जैसे कलाई घड़ी में तुला-चक्की)। विशेष परिस्थितियों में (जब दोलन का आयाम अत्यल्प हो और घर्षण-बल भी पर्याप्त कम हों) ऐसे दोलन संनादी माने जा सकते हैं। मरोड़ी दोलक का दोलन-काल :

* सूत्र (3.5) सिर्फ स्प्रिंग से लटके बोझ की स्थिति में ही नहीं, बल्कि उन सभी स्थितियों में काम आता है, जब सूत्र (3.3) लागू हो सकता है।

$$T=2\pi\sqrt{\frac{I}{D}}, \qquad (3.6)$$

जहां I=लटकन-बिंदु से गुजरने वाले अक्ष के गिर्द पिंड का जड़त्वाघूर्ण, D=मरोड़ी कड़ापन; सांख्यिक रूप से यह पिंड को इकाई कोण पर मरोड़ देने वाले घूर्णक आघूर्ण की आवश्यक मात्रा है।

भौतिक दोलक का दोलन-काल :

$$T=2\pi\sqrt{\frac{I}{mga}}, \qquad (3.7)$$

जहां I = लटकन-बिंदु से गुजरने वाले अक्ष के गिर्द पिंड का जड़त्वाघूर्ण, a=गुरुत्व-केंद्र से इस अक्ष की दूरी, m=पिंड का द्रव्यमान, g=स्वतंत्र अभिपातन का त्वरण।

राशि $l=I/ma$ भौतिक दोलक की समानयित लंबाई है, जो ऐसे गणितीय दोलक की लंबाई के बराबर होती है, जिसका दोलन-काल दिये हुए भौतिक दोलक के दोलन-काल के बराबर होता।

3. स्वतंत्र और बाध्य दोलन

दोलक व्यूह के अंदर उत्पन्न बलों के प्रभाव से होने वाले यांत्रिक दोलन **स्वतंत्र दोलन** कहलाते हैं। यदि पिंड के स्वतंत्र दोलनों का कारण सिर्फ प्रत्यास्थकल्प बल होगा, तो वे संनादी होंगे।

प्रत्यास्थकल्प बल और घर्षण-बल (जो क्षणिक वेग u का समानुपाती है: $F_{gn}=-ru$)* के सहप्रभाव से पिंड में होने वाले दोलन **नश्वर** कहलाते हैं। नश्वर दोलनों में विचलन है

$$u=Ae^{-\delta t}\sin(\omega t+\varphi). \qquad (3.8)$$

धन राशि A **आरंभिक आयाम** है, δ – **नश्वरता-गुणांक**, $Ae^{-\delta t}$ – **आयाम का क्षणिक मान** और ω – चक्रीय आवृत्ति। e प्राकृतिक लघुगणकों का आधार है। इसके अतिरिक्त,

$$\delta=\frac{r}{2m} \qquad (3.9)$$

* सूत्र में ऋण चिह्न का अर्थ है कि वेग व बल के सदिशों की दिशाएं विपरीत हैं।

$$\omega=\sqrt{\omega^2_0-\delta^2}, \qquad (3.10)$$

जहां r = प्रतिरोध का गुणांक, m = पिंड का द्रव्यमान; $\omega^2_0=k/m$, जहां

चित्र 26. नश्वर दोलन ($\varphi=0$)।

चित्र 27. भिन्न क्षीणतों के अनुनाद-वक्र। Oy अक्ष पर स्थानांतरण के सापेक्षिक आयाम, Ak/F_0 लिये गये हैं, जहां A = स्थानांतरण का आयाम, F_0/k = स्थैतिक स्थानांतरण, जो क्रियाशील बल के आयाम के बराबर वाले बल द्वारा उत्पन्न होता है। Ox अक्ष पर आवृति के सापेक्षिक परिवर्तन ω/ω_0 लिये गये हैं, जहां $\omega_0=\sqrt{k/m}$ = घर्षण नहीं होने पर स्वतंत्र दोलनों की आवृति। वक्र δ/ω_0 के भिन्न मानों के लिये हैं। नन्हें वृत्त स्थानांतरण-आयाम के महत्तम मानों की स्थिति दिखाते हैं।

k = प्रत्यास्थकल्प बल का गुणांक। नश्वर दोलन चित्र 26 जैसे वक्र द्वारा दिखाये जा सकते हैं।

वाह्य आवर्ती बल के प्रभाव से पिंड में उत्पन्न होने वाले दोलन **बाध्य दोलन** कहलाते हैं। जब ज्यावत वाह्य बल का आवर्त-काल पिंड के स्वतंत्र दोलनों के आवर्तकाल के निकट होने लगता है, तब बाध्य दोलनों का आयाम तेजी से बढ़ने लगता है (चित्र 27)। इस संवृति को अनुनाद कहते हैं।

यदि घर्षण-बल बहुत बड़ा होता है (बड़ी नश्वरता), तो अनुनाद क्षीण रूप से व्यक्त होता है (दे. चित्र 27) या बिल्कुल ही व्यक्त नहीं होता (उदाहरणार्थ, $\delta/\omega_0>1$ होने पर)।

जिस दोलक व्यूह में दोलन-काल के दरम्यान होने वाली ऊर्जा-हानि ऊर्जा के आंतरिक स्रोत द्वारा पूरी की जाती है, **स्वदोलक व्यूह** कहलाता है और ऐसे व्यूह में स्वयं अपना पोषण करने वाला दोलन **स्वदोलन** कहलाता है (जैसे घड़ी के पेंडुलम का दोलन)।

4. संनादी दोलनों का संयोजन

जब पिंड एक साथ दो (या अधिक) दोलन-गतियों में रत होता है, तब समय के किसी भी क्षण पर उसका परिणामी विचलन सभी विचलनों के सदिष्ट योग के बराबर होता है।

समान आवृत्ति व समान दिशा वाले दो संनादी दोलनों

$$u_1=A_1\sin(\omega t+\varphi_1),$$
$$u_2=A_2\sin(\omega t+\varphi_2) \qquad (3.11)$$

को जोड़ने पर परिणामी विचलन का आयाम A चित्र 28 में दर्शित समांतर

चित्र 28. समान दिशाओं वाले संनादी दोलनों में स्थानांतरण-आयामों का संयोजन।

चतुर्भुज के नियम द्वारा ज्ञात होता है। इस परिस्थिति में परिणामी विचलन होगा

$$u = A \sin (\omega t + \varphi_p), \qquad (3.12)$$

जहां

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)},$$

$$tg\varphi_p = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}.$$

जब पिंड एक साथ परस्पर लंब दिशाओं में समान आवृत्तियों वाले दो संनादी दोलन करता है, तब उसका विचलन निम्न समीकरणों द्वारा निर्धारित होता है :

$$\left.\begin{aligned} u_x &= A_1 \sin \omega t, \\ u_y &= A_2 \sin (\omega t + \varphi) \end{aligned}\right\} \qquad (3.13)$$

चित्र 29. परस्पर लंब संनादी दोलनों का संयोजन ।

और पिंड की गति का पथ दीर्घवृत्त के समीकरण द्वारा निरूपित होता है (चित्र 29) :

$$\frac{u_x^2}{A_1^2} + \frac{u_y^2}{A_2^2} - \frac{2u_xu_y}{A_1A_2} \cos \varphi = \sin^2 \varphi. \qquad (3.14)$$

$A_1 = A_2$ और $\varphi = 90°$ होने पर पिंड का गतिपथ वृत्त की परिधि होती है। $\varphi = 0$ होने पर पिंड *I* व *III* चतुर्थांश से गुजरने वाली सरल रेखा पर चलता है और $\varphi = \pi$ होने पर—*II* व *IV* चतुर्थांश से गुजरने वाली सरल रेखा पर।

5. तरंग

व्योम में दोलनों का सीमित वेग से प्रसरण **तरंग** कहलाता है। **दोलन व तरंग में भेद** निम्न बात से किया जाता है : यदि $L < vT$ (L = व्यूह की लंछक नापें, v = क्षोभों के प्रसरण का वेग, T = दोलन-काल), तो व्यूह में बार-बार दुहराये जाने वाले परिवर्तन दोलन कहलाते हैं; यदि $L > vT$, तो ऐसे परिवर्तन तरंग कहलाते हैं। उदाहरणार्थ, छड़ के एक सिरे को ठोकने

से संकोचन (या संपीडन) की अवस्था बनती है, जो एक नियत वेग से छड़ में उसके अनुतीर प्रसरण करती है।

व्योम में क्षोभों के प्रसरण का वेग **तरंग का वेग** कहलाता है।[1] यांत्रिक तरंगों का वेग माध्यम के गुणों पर निर्भर करता है और कुछ परिस्थितियों में आवृत्ति पर भी निर्भर करता है। आवृत्ति पर तरंग-वेग की निर्भरता **वेग-प्रकीर्णन** कहलाती है।

यांत्रिक तरंगों के प्रसरण में माध्यम के कण अपने संतुलन की स्थिति के सापेक्ष दोलन करते रहते हैं। माध्यम के कणों की ऐसी गति का वेग **दोलक वेग** कहलाता है।

यदि तरंग-प्रसरण के दरम्यान माध्यम की लंछक राशियां (जैसे घनत्व, कणों का स्थानांतरण, दाब आदि) व्योम के किसी भी बिंदु पर ज्यावत नियम के अनुसार बदलती रहती हैं, तो ऐसी तरंगों को **ज्यावत** (या **संनादी**) तरंगें कहते हैं। ज्यावत तरंगों का महत्त्वपूर्ण लंछक है तरंग की लंबाई या तरंग-दैर्घ्य। **तरंग की लंबाई** λ उस दूरी को कहते हैं, जिसे तरंग एक आवर्त काल के दरम्यान तय करती है :

$$\lambda = vT. \qquad (3.15)$$

आवृत्ति ν और तरंग की लंबाई λ निम्न संबंध रखते हैं :

$$\nu = v/\lambda, \qquad (3.16)$$

जहां v = तरंग का वेग।

निम्न प्रकार का गणितीय व्यंजन

$$u = A \sin \omega\left(t - \frac{r}{v}\right) = A \sin (\omega t - kr), \qquad (3.17)$$

ज्यावत तरंगों के प्रसरण के दरम्यान माध्यम की अवस्था में होने वाले परिवर्तन को निरूपित करता है; इसे **समतली संनादी तरंगों** का समीकरण कहते हैं।[2]

---

1. क्षोभ रिक्त व्योम (ज्यामितिक व्योम) में नहीं उत्पन्न होते, वे भौतिक व्योम (द्रव्य या क्षेत्र से छेंके हुए व्योम) में उत्पन्न होते हैं और उसी में उनका प्रसरण संभव है। ऐसे भौतिक व्योम को **माध्यम** कहते हैं। **क्षोभ** से तात्पर्य है भौतिक व्योम में भौतिक बिंदु का संतुलन की स्थिति से विचलन, जो व्योम के अन्य बिंदुओं को भी क्रमशः प्रभावित करता चला जाता है। —अनु.

2. u की जगह इस समीकरण में कोई भी परामितक हो सकता है, जो माध्यम की अवस्था लांछित करता है (जैसे दाब, तापक्रम आदि)।

इस समीकरण में A = तरंग का आयाम, ω = चक्रीय आवृति, r = तरंगोत्पादक स्रोत से व्योम के उस बिंदु की दूरी, जिस पर माध्यम के किसी गुण के परिवर्तन का अध्ययन किया जा रहा है; v = तरंग का वेग, $k = 2\pi/\lambda$ = तरंगी संख्या । $\omega t - kr$ को **तरंग की प्रावस्था** कहते हैं ।

जिस सतह के सारे बिंदु समान प्रावस्था में स्थित रहते हैं, उसे **तरंगी सतह** कहते हैं ।

रूप के अनुसार तरंगी सतहें **समतल** होती हैं (समतल तरंगी सतहें), या **बेलनाकार** (बेलनाकार तरंगी सतहें), या **वर्तुल** (वर्तुल तरंगी सतहें) । बेलनाकार व वर्तुल तरंगों के समीकरण हैं :

$$u_b = \frac{A}{\sqrt{r}} \sin(\omega t - kr), \qquad (3.18)$$

$$u_w = \frac{A}{r} \sin(\omega t - kr), \qquad (3.19)$$

जहां A तरंग के स्रोत से इकाई दूरी पर तरंग के आयाम का सांख्यिक मान है ।

यदि माध्यम के कणों का विचलन तरंग-प्रसरण की समानांतर दिशा में हो रहा है, तो ऐसी तरंग को **अनुतीरी** कहते हैं; यदि कणों का विचलन तरंग-प्रसरण की दिशा के अभिलंब समतल में हो रहा है, तो तरंग को **अनुप्रस्थी** कहते हैं । तरल (द्रव व गैसीय) माध्यम में यांत्रिक तरंगें अनुतीरी होती हैं; ठोस पिंडों में अनुतीरी व अनुप्रस्थी दोनों ही प्रकार की तरंगें संभव हैं ।

छड़ में अनुतीरी तरंगों का वेग :

$$v_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \qquad (3.20)$$

जहां E यंग का मापांक है, ρ = घनत्व है ।

ठोस पिंड में, जिसकी अनुप्रस्थी मापें प्रसरवान तरंगों की लंबाई से बहुत बड़ी हैं, अनुतीरी तरंग का वेग होगा :

$$v_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}}, \qquad (3.21)$$

जहां ρ = द्रव्य का घनत्व, E = यंग का मापांक, μ = पुआसोन का गुणांक (दे. सारणी 17) ।

पतले पत्तरों में अनुतीरी तरंगों का वेग :

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}, \qquad (3.22)$$

द्रव में अनुतीरी तरंगों का वेग :

$$v_{dr} = \frac{\gamma}{\rho\beta_{st}}, \qquad (3.23)$$

जहां β_{st} = समतापक्रमी संपीड्यता*, $\gamma = c_p/c_V$ ।

अनुप्रस्थी तरंगों का वेग :

$$v_2 = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \qquad (3.24)$$

जहां G = सर्पन का मापांक (दे. पृ. 47)

गैस में ध्वनि-तरंगों का वेग :

$$v_g = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}}, \qquad (3.25)$$

जहां $\gamma = c_p/c_V$, p = दाब ।

सूत्र (3.25) आदर्श गैसों पर लागू किया जा सकता है और इस स्थिति में उसे निम्न रूप दिया जा सकता है (R, μ, T—दे. पृ. 70) :

$$v_g = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}} \qquad (3.26)$$

द्रव की सतह पर तरंगें न तो अनुतीरी होती हैं, न अनुप्रस्थी । सतही तरंगों में पानी के कणों की गति अधिक जटिल होती है (दे. चित्र 30) ।

सतही तरंगों का वेग** :

* संपीड्यता—दे. पृ. 47; समतापक्रमी संपीड्यता स्थिर तापक्रम पर होने वाली संपीडन-प्रक्रिया है ।

** सूत्र (2.7) द्रव व गैस के विभाजक तल पर उठने वाली तरंगों के लिये भी लागू हो सकता है, यदि द्रव का घनत्व गैस के घनत्व से बहुत अधिक होता है ।

$$v_{sat}=\sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}+\frac{2\pi\alpha}{\lambda\rho}}, \qquad (3.27)$$

जहां g=स्वतंत्र अभिपातन का त्वरण, λ=तरंग-लंबाई, α=तलीय तनाव का गुणांक, ρ=घनत्व ।

सूत्र (3.27) तभी लागू किया जा सकता है, जब द्रव की गहराई $0.5\ \lambda$ से कम नहीं होती है ।

यदि द्रव की गहराई h कम हो (0.5λ से), तो

$$v_{sat}=\sqrt{gh}. \qquad (3.28)$$

तरंग-प्रसरण की क्रिया में ऊर्जा का स्थानांतरण होता है, पर माध्यम के कण तरंग-प्रसरण की दिशा में स्थानांतरित नहीं होते, वे संतुलन की स्थिति के गिर्द सिर्फ दोलन करते रहते हैं (यदि तरंगों का आयाम अत्यल्प है और माध्यम श्यान नहीं है)। तरंग द्वारा इकाई समय में तरंगी सतह के इकाई क्षेत्रफल के पार स्थानांतरित औसत ऊर्जा का सांख्यिक मान **तरंग की तीव्रता** कहलाता है । तीव्रता को W/m^2 में व्यक्त करते हैं । ध्वनि तरंगों की तीव्रता **ध्वनि की तीव्रता** कहलाती है ।

चित्र 30. सतही तरंगों के प्रसर में जलीय कणों के पथ :
(a) कम गहरे पानी में; (b) गहरे पानी में (अनुपात $2\pi h/\lambda \gg 1$);
(c) छिछले पानी में (अनुपात $2\pi h/\lambda \ll 1$) ।

यांत्रिक तरंगों के प्रसरण में माध्यम के कणों के वेग व त्वरण उन्हीं संनादी नियमों के अनुसार बदलते हैं, जिनके अनुसार विचलन में परिवर्तन होता है ।

यदि चक्रीय आवृत्ति ω वाली समतल संनादी तरंग के प्रसरण में कणों के विचलन के आयाम का मान u_0 होता है, तो दोलकी वेग के आयाम का मान होगा

$$v_0=\omega u_0. \qquad (3.29)$$

त्वरण का आयाम होगा

$$a_0=\omega^2 u_0, \qquad (3.30)$$

और तीव्रता

$$I=\frac{1}{2}\rho v u_0^2, \qquad (3.31)$$

जहां ρ=माध्यम का घनत्व, v=तरंग का वेग ।

6. स्थावर तरंग

स्थावर तरंग एक-दूसरे की ओर दौड़ती दो एकवर्णी (एक निश्चित आवृत्ति वाली) तरंगों की व्यतिक्रिया से बनती है ।

यदि कोई **समतली तरंग** (व्योम के प्रत्येक बिंदु पर समान प्रसरण-दिशा रखने वाली तरंग) अक्ष OX की धन दिशा में प्रसरित होती है और ऐसी ही दूसरी तरंग इसकी विपरीत दिशा में, तो इन तरंगों के समीकरण का रूप होगा :

$$u_1=A_1\cos(\omega t-kx+\varphi_1)$$
$$u_2=A_2\cos(\omega t-kx+\varphi_2) \qquad (3.32)$$

स्थानांतरण u_1 वाली तरंग को **धावी तरंग** कहते हैं और u_2 वाली को —**परावर्तित तरंग** ।

दिशांक-मूल और काल-मूल (जिस क्षण से समय नापना शुरू करते हैं) को इस प्रकार चुना जा सकता है कि आरंभिक प्रावस्थाएं φ_1 व φ_2 शून्य हो जायें । इससे समीकरण (3.32) का रूप कुछ सरल हो जायेगा और परिणामी तरंग के समीकरण का रूप होगा :

$$u=u_1+u_2=2A_1\cos(kx)\cos(\omega t) \qquad (3.33)$$

संबंध (3.33) ही समतली स्थावर तरंग का समीकरण है । स्थावर तरंग का आयाम

$$A=2A_1\cos(kx). \qquad (3.34)$$

संबंध (3.34) को संबंध (3.12) से प्राप्त किया जा सकता है, यदि $\varphi_1 = -kx$, $\varphi_2 = kx$, $A_1 = A_2$ ।

जिन बिंदुओं पर स्थावर तरंग का आयाम महत्तम मान रखता है, उन्हें **अपगम** कहते हैं; ये बिंदु शर्त $x = m\lambda/2$ ($m = 0, 1, 2, \ldots$) से निर्धारित होते हैं। समतली स्थावर तरंग के अपगम उन तलों पर बनते हैं, जिनके दिशांक शर्त $x = m\lambda/2$ ($m = 0, 1, 2, \ldots$) को पूरा करते हैं।

स्थावर तरंग का आयाम जिन बिंदुओं पर शून्य होता है, उन्हें संगम कहते हैं; ये शर्त $x = (m + \frac{1}{2})\ \lambda/2$ ($m = 0, 1, 2, \ldots$) से निर्धारित होते हैं। समतली स्थावर तरंग के संगम उन तलों पर बनते हैं, जिनके दिशांक शर्त्त $x = (m + \frac{1}{2})\ \lambda/2$ ($m = 0, 1, 2, \ldots$) को संतुष्ट करते हैं।

संगम और अपगम व्योम में एक-दूसरे के सापेक्ष चौथाई तरंग-लंबाई पर स्थानांतरित रहते हैं। समीकरण (3.33) से निष्कर्ष निकलता है कि

(*a*) भिन्न बिंदुओं पर दोलनों के आयाम एक जैसे नहीं होते; उनके मान 0 से $2A_1$ के अंतराल में बदलता रहता है;

(*b*) दो निकटतम संगमों के बीच दोलनों की प्रावस्थाएं समान होती हैं और संगम पार करते वक्त उनमें झटके से π जितना परिवर्तन होता है;

(*c*) ऊर्जा का वहन नहीं होता, अर्थात् किसी भी काट (अनुच्छेद) में औसत ऊर्जा-प्रवाह शून्य के बराबर होता है; ऊर्जा सिर्फ संगम से निकटतम अपगम की ओर प्रवाहित होती है और फिर वापस हो जाती है।

यदि परावर्तित तरंग का आयाम धावी तरंग के आयाम से कम हो, तो संगमों पर दोलन का आयाम होगा : $(A_1 - A_2)$, जहां A_1 व A_2 क्रमशः धावी व परावर्तित तरंगों के आयाम हैं। अपगमों पर दोलन का आयाम होगा : $(A_1 + A_2)$ ।

अनुपात $(A_1 + A_2)/(A_1 - A_2)$ को **स्थावर तरंग का गुणांक** कहते हैं।

7. ध्वनि

ध्वनि ऐसी यांत्रिक तरंगों को कहते हैं, जिनकी आवृत्तियां 17-20 से 20000 Hz की सीमा में होती हैं। आदमी का कान यांत्रिक तरंगों की इन आवृत्तियों को अनुभव करने की क्षमता रखता है। 17 Hz से नीचे की

आवृत्ति वाली ध्वनि को **अवध्वनि** कहते हैं और 20000 Hz से ऊपर वाली को **पराध्वनि** कहते हैं।

ध्वनि की अनुभूति के साथ-साथ आदमी का कान ध्वनि की **वज्रिता** (loudness), तारता (pitch) और स्वरिता (timbre) में भेद भी करता है। ध्वनि की **वज्रिता** दोलनों के आयाम द्वारा निर्धारित होती है, **तारता**—आवृत्ति द्वारा और **स्वरिता**—अधिगुरों के (अधिक उच्च आवृत्ति वाले) दोलनों के आयाम द्वारा।

ध्वनिक तरंगों के प्रसरण के कारण माध्यम में दाब-परिवर्तन (तरंगों की अनुपस्थिति में जो दाब होता है, उसकी तुलना में होने वाला दाब-परिवर्तन) **ध्वनि का दाब** कहलाता है। ध्वनि-दाब का आयाम $\triangle p_0$ दोलकी वेग के आयाम u_0 के साथ निम्न सूत्र द्वारा जुड़ा है :

$$\triangle p_0 = \rho v u_0 \qquad (3.35)$$

माध्यम में अवशोषण के कारण समतली ध्वनिक तरंगों की तीव्रता निम्न नियम के अनुसार कम होती है :

$$I_x = I_0 e^{-2\alpha x} \qquad (3.36)$$

जहां I_0—माध्यम में प्रवेश करने वाली तरंगों की तीव्रता, I_x = पथ x तय करने के बाद उनकी तीव्रता।

ध्वनि-तरंगों का क्षीणन-स्तर निर्धारित करने वाली राशि α को **ध्वनि के अवशोषण का गुणांक** (आयाम के अनुसार) कहते हैं।

सुनने में ध्वनिक तीव्रता की अनुभूति वज्रिता की अनुभूति के अनुरूप होती है। तीव्रता के एक नियत निम्नतम मान पर आदमी का कान ध्वनि अनुभव करने में असमर्थ रहता है। इस निम्नतम तीव्रता को **श्रव्यता की दहलीज** (अवसीमा) कहते हैं। भिन्न आवृत्तियों वाली ध्वनियों के लिए श्रव्यता की दहलीज के मान भिन्न होते हैं। बहुत अधिक तीव्रता होने पर कान में दर्द की अनुभूति होती है। दर्द की अनुभूति के लिए आवश्यक निम्नतम तीव्रता को **दर्दानुभूति की अवसीमा** (दहलीज) कहते हैं।

ध्वनि-तीव्रता का स्तर डेसीबेल (db) नामक इकाइयों में निर्धारित करते हैं। डेसीबेलों की संख्या तीव्रता-अनुपात के दशमिक लघुगणक की दस गुनी संख्या, अर्थात् $10\ \lg\ (I/I_0)$ है। ध्वनिकी में अक्सर I_0 की जगह 1 pJ/(m²·s) रखते हैं; यह 1000 Hz पर श्रव्यता की दहलीज के अनुरूप वाली तीव्रता के लगभग है।

सारणी और ग्राफ

सारणी 61. **शुद्ध द्रवों और तेलों में ध्वनि-वेग**

द्रव	t, °C	v, m/s	a, m/s·K
शुद्ध द्रव			
अल्कोहल, एथिल	20	1180	—3.6
अल्कोहल, मेथिल	20	1123	—3.3
एनीलीन	20	1656	—4.6
एसीटोन	20	1192	—5.5
किरासीन	34	1295	—
ग्लीसरीन	20	1923	—1.8
पारा	20	1451	—0.46
पानी समुद्री	17	1510-1550	—
पानी साधारण	25	1497	2.5
बेन्जोल	20	1326	—5.2
तेल			
अलसी	31.5	1772	—
गैसोलीन	34	1250	—
जेतून	32.5	1381	—
ट्रान्सफॉर्मर के लिए	32.5	1425	—
तर्कु (एक झाड़ी)	32	1342	—
तोरी (rapeseed)	30.8	1450	—
देवदार (का)	29	1406	—
मूंगफली	31.5	1562	—
यूकेलिप्टस	29.5	1276	—

टिप्पणी :—तापक्रम बढ़ने पर द्रव में (पानी को छोड़कर) ध्वनि-वेग घटता है। अन्य तापक्रमों पर ध्वनि-वेग सूत्र $V_t = v + \alpha(t - t_0)$ से ज्ञात किया जा सकता है, जिसमें v=सारणी में दिया गया वेग, α=तापक्रम-गुणांक (सारणी के अंतिम स्तम्भ में दिया है), t=तापक्रम, जिस पर ध्वनि-वेग ज्ञात करना है, t_0=सारणी में दिया गया तापक्रम।

सारणी 62 **ठोस पदार्थों में ध्वनि-वेग (20 °C पर)**

पदार्थ	v_0, m/s	v_1, m/s	v_2, m/s
अबरक	—	7760	2160
अलूमीनियम	5080	6260	3080
इस्पात	5170	5850	3230
एबोनाइट	1570	2405	—
काँच, क्राउन	5300	5660	3420
काँच, भारी क्राउन	4710	5260	2960
काँच, भारी फ्लिंट	3490	3760	2220
काँच, हल्का फ्लिंट	4550	4800	2950
काँच, क्वार्ट्स	5370	5570	3515
काग	500	—	—
चूना पत्थर	—	6130	3200
जस्ता	3810	4170	2410
टिन	2730	3320	1670
तांबा	3710	4700	2260
निकेल	4785	5630	2960
पीतल	3490	4430	2123
पेरिस का प्लास्टर	—	4970	2370
पोर्सलीन	4884	5340	3120
पोलीस्टीरीन	—	2350	1120
प्लेक्सी ग्लास	—	2670	1121
बर्फ	3280	3980	1990
रबर	46	1040	27
लोहा	5170	5850	3230
संगमरमर	—	6150	3260
सीसा	2640	3600	1590
स्लेट	—	5870	2800

टिप्पणी :—v_0 छड़ में अनुतीरी तरंगों का वेग है, v_1 या v_2 अनंत माध्यम में क्रमशः अनुतीरी व अनुप्रस्थी तरंगों के वेग है।

सारणी 63. **भिन्न गहराइयों पर जमीन के गुण और भूकंपी तरंगों का वेग**

H, km	ρ, Mg/m^3	v_1, km/s	v_2, km/s	p, GPa	g, m/s^2
33	3.32	8.18	4.63	0.9	9.85
100	3.38	8.18	4.63	3.1	9.89
200	3.47	8.29	4.63	6.5	9.92
500	3.89	9.65	5.31	17.4	9.99
1000	4.68	11.42	6.36	39.2	9.95
2000	5.24	12.79	6.93	88	9.86
4000	10.8	9.51	—	240	8.00
5000	11.5	10.44	—	318	6.13

टिप्पणी :—भू-पर्पटी में प्रसरमान यांत्रिक तरंगों को **भूकंपी तरंगें** कहते है। ये अनतीरी भी हो सकती हैं (संपीडन की तरंगें, वेग v_1) और अनुप्रस्थी भी (अपरूपण की तरंगें, वेग v_2), गहराई H पर घनत्व ρ, दाब p, त्वरण g भी दिए जा रहे हैं।

सारणी 64. **सामान्य दाब पर गैसों में ध्वनि-वेग**

गैस	t, °C	v, m/s	α, m/(s·K)
अमोनिया	0	415	—
अल्कोहल, एथिल	97	269	0.4
अल्कोहल, मेथिल	97	335	0.46
आक्सीजन	0	316	0.56
कार्बन डायक्साइड	0	259	0.4
जलवाष्प	134	494	—
नाइट्रोजन	0	334	0.6
नियोन	0	435	0.8
बेंजोल (वाष्प)	97	202	0.3
हवा	0	331	0.59
हाइड्रोजन	0	1284	2.2
हीलियम	0	965	0.8

टिप्पणी :—1. स्थिर दाब पर तापक्रम बढ़ने से गैसों में ध्वनि-वेग बढ़ता है इसीलिये अन्य तापक्रमों पर वेग ज्ञात करने के लिये वेग-परिवर्तन का तापक्रम-गुणांक दिया गया है (दे. सा. 61)।

2. उच्च आवृत्ति (या न्यून दाब) पर ध्वनि-वेग आवृत्ति से संबंधित होता है। प्रदत्त मान ऐसी आवृत्ति व दाब के लिये हैं, जिन पर ध्वनि-वेग व्यावहारिकतः निर्भर नहीं करता।

हवा और नाइट्रोजन में ध्वनि-वेग

चित्र 31. हवा व नाइट्रोजन में ध्वनि-वेग की दाब पर निर्भरता। निर्भरता 20 °C तापक्रम और 200 से 500 kHz तक के आवृत्ति-परास के लिये है।

सारणी 65. **यांत्रिक तरंगों का पैमाना**

आवृत्ति Hz	नाम	उत्पन्न करने की विधियां	उपयोग
0.5-20	अवध्वनि	बड़े जलाशयों में पानी का दोलन, हृदय का स्पंदन	मौसम-भविष्यवाणी, हृद्-रोगों का विश्लेषण
20-2·10^4	श्रव्य ध्वनि	मनुष्य व जीवों के स्वर, वाद्य यंत्र, सीटी, साइरेन, वक्तभाषी (लाउड स्पीकर) आदि	संपर्क, संचार व संकेतन के लिये, दूरी नापने के लिये (स्वनमिति)

(सारणी 65, समापन)

आवृत्ति Hz	नाम	उत्पन्न करने की विधियाँ	उपयोग
$2 \cdot 10^4$-10^{10}	पराध्वनि	चुंबकीय विरूपक व दाब-वैद्युत स्रोत, गैल्टन की सीटी; कुछ जीव-जंतु और कीड़े-मकोड़े (चमगादड़, झिंगुर, टिड्डे आदि)	जलगत मापन, पुर्जों की सफाई, पुर्जों व इमारती अवयवों में उपस्थित ऐब का पता लगाना, रसायनिक प्रतिक्रियाओं को त्वरित करना, जीव- व चिकित्सा-विज्ञान में अध्ययन, आण्विक भौतिकी
10^{11} व अधिक	अतिध्वनि	अणुओं का तापीय दोलन कंपन	वैज्ञानिक अनुसंधान-कार्यों में

सारणी 66. **ध्वनि-तीव्रता I और ध्वनि-दाब Δp**

डेसीबेल	I, W/m²	Δp, Pa	उदाहरण
0	10^{-12}	0.00002	आदमी के कान की संवेदना-सीमा।
10	10^{-11}	0.000065	पत्तों की सरसराहट, एक मीटर की दूरी पर धीमी फुसफुसाहट।
20	10^{-10}	0.002	शांत उपवन।
30	10^{-9}	0.00065	शांत कमरा, दर्शक-कक्ष में शोर का सामान्य स्तर। वायोलिन पर पियानोसीमो (अत्यंत धीमा वादन)।
40	10^{-8}	0.002	धीमा संगीत। रहने के कमरे में शोर।
50	10^{-7}	0.0065	निम्न स्तर पर वक्तभाषी। खुली खिड़कियों वाले रेस्तरां या औफिस में शोर।
60	10^{-6}	0.02	तेज रेडियो/दुकान में शोर। 1m की दूरी पर सामान्य स्वर में बात-चीत।
70	10^{-5}	0.0645	ट्रक के मोटर का शोर। ट्राम में शोर।
80	10^{-4}	0.20	चहल-पहल वाली गली। टंकन-विभाग।
90	10^{-3}	0.645	मोटर का हौर्न। बड़ी वाद्य-मंडली द्वारा तेज वादन।
100	10^{-2}	2.0	कील ठोकने वाली मशीन। मोटरगाड़ी में साइरेन।
110	10^{-1}	6.45	वातिल (वायु-चालित) हथौड़ा।
120	1	20	5m दूर स्थित जेट-इंजन। जोर का घन-गर्जन।
130	10	64.5	दर्द की दहलीज, ध्वनि सुनायी नहीं देती।

पानी की सतह पर तरंगों का वेग

तरंगों की लंबाई अल्प (2 cm से कम) होने पर मूल भूमिका तलीय तनाव के बलों की होती है; ऐसी तरंगों को केशिका तरंग कहते हैं।

चित्र 32. सतही तरंगों का प्रकीर्णन (h > 0.5λ)।

तरंगों की लंबाई अधिक होने पर मूल भूमिका गुरुत्व-बल अदा करते हैं; ऐसी तरंगों को **भारी (या गुरुत्वी) तरंग** कहते हैं। सतही तरंगों का वेग

श्रव्य संवेदना के लिए ध्वनि-वज्रिता के स्तर

चित्र 33. वज्रिता-स्तर।

तरंग की लंबाई पर निर्भर करती है (चित्र 32; सूत्र 3.27)—यह उस हालत में, जब द्रव की गहराई पर्याप्त अधिक हो ($h > 0.5\,\lambda$)।

चित्र 33 में समान वज्रिता के तीव्रता-वक्र दिखाये गये हैं। ऊपरी वक्र दर्दानुभूति की दहलीज के अनुरूप है और निचला वक्र—श्रव्यता की दहलीज के। आवृत्ति के मान लघुगणकी पैमाने पर दिये गये है।

सारणी 67. भिन्न माध्यमों के विभाजक तल पर लंब रूप से आपतित ध्वनि-तरंगों का परावर्तन-गुणांक (% में)

द्रव्य	अलुमीनियम	जल	ट्रांसफार्मर का तेल	तांबा	निकेल	पारा	फौलाद	शीशा
अलुमीनियम	0	72	74	18	·24	1	21	2
जल	72	0	0.6	87	89	75	88	65
ट्रान्सफार्मर का तेल	74	0.6	0	88	90	76	89	67
निकेल	24	89	90	0.8	0	19	0.2	34
पारा	1	75	76	13	19	0	16	4
फौलाद	21	88	89	0.3	0.2	16	0	31
शीशा	2	65	67	19	34	4	31	0

टिप्पणी :—(1) **परावर्तन-गुणांक** परावर्तित व आपतित ध्वनि-तरंगों की तीव्रताओं के अनुपात को कहते हैं।

(2) एक माध्यम से दूसरे में प्रवेश करते वक्त और दूसरे से पहले में आते वक्त ध्वनि के परावर्तन-गुणांक समान होते हैं।

(3) यदि परावर्तन किसी पत्तर (प्लेट) से हो रहा है, तो परावर्तन-गुणांक उसकी मुटाई व तरंग-दैर्घ्य के अनुपात पर निर्भर करेगा।

सारणी 68. हवा में ध्वनि-अवशोषण का गुणांक (α. 10^{-4} cm^{-1}); 20 °C पर

आवृत्ति kHz	हवा की सापेक्षिक आर्द्रता, %				
	10	20	40	60	80
1	0.13	0.06	0.03	0.03	0.03
2	0.47	0.23	0.10	0.09	0.08
4	1.27	0.82	0.38	0.24	0.20
6	1.87	1.61	0.84	0.54	0.39
8	2.26	2.48	1.45	0.96	0.69
10	2.53	3.28	2.20	1.47	1.08

टिप्पणी :—ये मान सामान्य दाब के निकटवर्ती मानों के लिये सही है।

सारणी 69. द्रव्यों की ध्वनि-अवशोषक क्षमता

द्रव्य	आवृत्ति, Hz					
	126	250	500	1000	2000	4000
ईंट की दीवार	0.024	0.025	0.032	0.041	0.049	0.07
कपास का कपड़ा	0.3	0.04	0.11	0.17	0.24	0.35
काँच (इकहरा)	0.03	—	0.027	—	0.02	—
काँचर ऊन (9 cm मोटा)	0.32	0.40	0.51	0.60	0.65	0.60
नमदा (25 mm मोटा)	0.18	0.36	0.71	0.79	0.82	0.85
प्लास्तर, चूने का	0.025	0.045	0.06	0.085	0.043	0.058
प्लास्टर, जिप्स का	0.013	0.015	0.020	0.028	0.04	0.05
रोएंदार कंबल	0.09	0.08	0.21	0.27	0.27	0.37
लकड़ी के तख्ते	0.10	0.11	0.11	0.18	0.082	0.11
संगमर्मर	0.01	—	0.01	—	0.015	—

टिप्पणी :—**ध्वनि-अवशोषक क्षमता** ध्वनि की अवशोषित ऊर्जा और परावर्तक सतह पर आपतित ऊर्जा के अनुपात को कहते हैं।

सारणी 70. द्रवों में ध्वनि का अवशोषण

द्रव	t, °C	आवृत्ति का परास, MHz	a/ν^2, 10^{-17} s²/cm
अंडी का तेल	18.5	3	11000
एथिल अल्कोहल	20	7-100	52
एथिल ईथर	25	10	140
एसीटोन	25	4-20	50
किरासीन	25	6-20	110
ग्लीसरीन	26	4-20	1700
टर्पेन्टाइन	25	10	150
नाइट्रोजन	—199	44.5	11
पानी	20	1-200	25
पारा	20	0.5-1000	5.5
पेट्रोलियम	25	10	~100
बेंजोल	20	1-200	850-900
मेथिल अल्कोहल	20	5-46	43

टिप्पणी : – सारणी में दिये गये मान 0.1-2 MPa जैसे दाबों के लिये हैं। इन मानों पर अवशोषण व्यवहारिकतः दाब पर निर्भर नहीं करता।

सारणी 71. समुद्री पानी में ध्वनि-तरंगों के अवशोषण का गुणांक (15-20 °C पर)

ν, kHz	20	24	100	200	230	480	940
a, 10^{-4} cm⁻¹	0.023	0.050	0.37	0.69	1.25	2.00	2.90

विद्युत

A. वैद्युत क्षेत्र

मूल अवधारणाएं और नियम

वैद्युत आवेश दो प्रकार के होते हैं—धन और ऋण। **धनावेश** सिल्क के साथ रगड़े गये कांच पर उत्पन्न होता है और **ऋणावेश** रोएंदार चमड़े के साथ रगड़े गये एबोनाइट पर उत्पन्न होता है। समान आवेश एक दूसरे से विकर्षित होते हैं और असामान आवेश परस्पर आकर्षित होते हैं।

परमाणु में ऋणावेश के वाहक एलेक्ट्रोन होते है और धनावेश के—प्रोटोन, जो परमाणु के नाभिक में स्थित होते हैं (दे. पृ. 247)। परमाणु में धन व ऋण आवेशों का कुल योग शून्य होता है; आवेश इस प्रकार से वितरित रहते हैं कि परमाणु सामान्यतः उदासीन रहता है।

विद्युतन की प्रक्रिया में पिंडों के बीच धन व ऋण आवेशों का वितरण असमान हो जाता है (जैसे घर्षण द्वारा विद्युतन में या गैल्वेनी सेल में, दे. पृ. 149); ऐसा असमान वितरण एक ही पिंड के भिन्न भागों के बीच भी संभव है (जैसे वैद्युत प्रेरण में, दे. पृ. 134)।

वैद्युत आवेशों का न तो जन्म होता है, न नाश ही; उनका सिर्फ स्थानांतरण होता है—एक पिंड से दूसरे में, या एक ही पिंड की सीमा में, या अणु के भीतर, परमाणु के भीतर आदि (**वैद्युत आवेशों के संरक्षण का नियम**)।

आवेशों के वाहक भिन्न माध्यमों में भिन्न हो सकते हैं: परमाणु से अलग हो जाने वाले एलेक्ट्रोन (जैसे धातु में); अणु या परमाणु के अंश, जो धन या ऋण आवेश रखते हैं (अर्थात् आयन, जैसे वैद्युत अपघटक में या गैस में); द्रव में उपस्थित आवेशयुक्त कलिलीय कण, जिन्हें मोलायन कहते हैं।

मान के अनुसार कोई भी आवेश एलेक्ट्रोन के आवेश का अपवर्त्य होता है। एलेक्ट्रोन के आवेश का मान निम्नतम है (e); आवेश की इस अल्पतम खुराक को **प्राथमिक आवेश** कहते हैं। प्रोटोन का आवेश परम मान (मापांक) में एलेक्ट्रोन के आवेश के बराबर होता है।

आवेशों की व्यतिक्रिया. वैद्युत क्षेत्र. बिंदु-आवेशों की व्यतिक्रिया का नियम (**कूलम्ब का नियम**) : जड़त्वी मापतंत्र में, जिसके सापेक्ष आवेश स्थिर हैं, परस्पर व्यतिक्रिया का बल

$$\mathbf{F}_{12}=\frac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_{12}^2}\ \mathbf{r}_0,$$

और

$$|\mathbf{F}_{12}|=\frac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_{12}^2}\qquad(4.1)$$

होता है, जहाँ $\mathbf{r}_0$= त्रिज्य सदिश $\mathbf{r}_{12}$ का इकाई सदिश, $\mathbf{F}_{12}$= आवेश Q_1 के वैद्युत क्षेत्र में उससे दूरी r_{12} पर स्थित आवेश Q_2 पर क्रियाशील बल, $\mathbf{r}_{12}$= आवेश Q_1 से आवेश Q_2 तक खींचा गया त्रिज्य सदिश, ε_0= **वैद्युत स्थिरांक (निर्वात की पारवैद्युत वेधिता)**, ε= माध्यम की **आपेक्षिक पारवैद्युत वेधिता**; ε दिखाता है कि निर्वात की तुलना में समसर्वत्र असीम माध्यम बिंदु-आवेशों की व्यतिक्रिया को कितना गुना कम करता है। बल $\mathbf{F}_{21}$ आवेश Q_2 के वैद्युत क्षेत्र में स्थित आवेश Q_1 पर क्रियाशील बल है, जो मान में $|\mathbf{F}_{12}|$ के बराबर होता है। $\mathbf{F}_{12}$ व $\mathbf{F}_{21}$ बलों की दिशाएँ परस्पर विपरीत हैं और उनकी क्रिया-रेखा आवेशों से होकर गुजरती है। गतिमान आवेशों की व्यतिक्रिया के बारे में दे. पृ. 178।

अंतर्राष्ट्रीय इकाई-प्रणाली में वैद्युत स्थिरांक

$$\varepsilon_0=\frac{1}{36\pi\cdot10^9}\ \frac{\text{फराड}}{\text{मीटर}}=8.85\cdot10^{-12}\ \frac{\text{F}}{\text{m}},$$

अ. प्र. में आवेश की इकाई **कूलंब** (C) है। 1C ऐसा आवेश है, जिसे 1A की धारा चालक के अनुप्रस्थ काट से 1s में गुजारती है (दे. पृ. 174)।

यदि व्योम में अचल वैद्युत आवेशों पर बलों की क्रिया प्रेक्षित होती है, तो कहते हैं व्योम में **वैद्युत क्षेत्र** उपस्थित है।

विद्युत से आविष्ट पिंड हमेशा वैद्युत क्षेत्र से घिरे रहते हैं। अचल आवेशों के क्षेत्र को **विद्युत्स्थैतिक क्षेत्र** कहते हैं। दिये हुए बिंदु पर वैद्युत क्षेत्र की

तीव्रता सांख्यिक रूप से उस बल के बराबर होती है, जो उस बिंदु पर रखे गये इकाई धनावेश पर क्रिया करता है :

$$\mathbf{E}=\frac{\mathbf{F}}{Q}\quad\text{और}\quad|\mathbf{E}|=\frac{F}{Q}.\qquad(4.2)$$

तीव्रता सदिष्ट राशि है। इसकी दिशा धनावेश पर क्रियाशील बल की दिशा जैसी होती है। दो या अधिक विद्युत-आवेशों के क्षेत्रों की तीव्रताएँ सदिशों की भाँति संयोजित होती हैं (दे. भूमिका)।

बिंदु-आवेश के वैद्युत क्षेत्र की तीव्रता (दिये हुए बिंदु पर) :

$$\mathbf{E}_b=\frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2}\ \mathbf{r}_0$$

और

$$|\mathbf{E}_b|=\frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2},\qquad(4.3)$$

जहाँ $\mathbf{r}$= आवेश Q से विचाराधीन बिंदु तक खींचा गया त्रिज्य सदिश, $\mathbf{r}_0$= इकाई सदिश।

समसर्वत्र आविष्ट अनन्त तल के वैद्युत क्षेत्र की तीव्रता

$$E_t=\frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0},\qquad(4.4)$$

जहाँ σ= आवेश का तलीय घनत्व, अर्थात् तल के इकाई क्षेत्र पर उपस्थित आवेश है।

समसर्वत्र आविष्ट गोले के वैद्युत क्षेत्र की तीव्रता

$$\mathbf{E}_{go}=\frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2}\ \mathbf{r}_0$$

और

$$|\mathbf{E}_{go}|=\frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2},\qquad(4.5)$$

जहाँ $\mathbf{r}$= गोले के केन्द्र से विचाराधीन बिंदु तक खींचा गया त्रिज्य सदिश, $\mathbf{r}_0$= इकाई सदिश।

लंबे, समसर्वत्र आविष्ट बेलन के वैद्युत क्षेत्र की तीव्रता

$$\mathbf{E}_{be}=\frac{\tau}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 r}\ \mathbf{r}_0$$

और

$$|\mathbf{E}_{be}| = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 r}, \qquad (4.6)$$

जहाँ τ = आवेश का रैखिक घनत्व, अर्थात् बेलन की इकाई लम्बाई पर स्थित आवेश; $\mathbf{r}$ = बेलन के अक्ष से उसकी लम्ब दिशा में विचाराधीन बिंदु तक खींचा गया त्रिज्य सदिश, r_0 = इकाई सदिश।

सदिष्ट राशि $\mathbf{D} = \varepsilon_0\varepsilon\mathbf{E}$ को **वैद्युत स्थानांतरण** कहते हैं (पुराना नाम विद्युत-प्रेरण है)।

रेखा, जिसके प्रत्येक बिन्दु की स्पर्श-रेखा तीव्रता की दिशा बताती है, विद्युत-क्षेत्र की **बल-रेखा** कहलाती है। चित्र 34-36 में भिन्न संरचनाओं वाली बल रेखाएँ दिखायी गयी हैं।

चित्र 34. बिंदु-आवेश के वैद्युत-क्षेत्र की बल-रेखाएं।

चित्र 35. बल रेखाएं : (a) विपरीत चिह्न वाले दो बिंदु-आवेशों के क्षेत्र में (b) समान चिह्न वाले दो बिंदु-आवेशों के क्षेत्र में।

चित्र 36. चपटे संघनक का वैद्युत क्षेत्र।

कार्य और वोल्टता. विद्युत-क्षेत्र के बलों द्वारा आवेश के स्थानांतरण की क्रिया में कार्य संपन्न होता है। विद्युत्स्थैतिक क्षेत्र में कार्य पथ की आकृति पर निर्भर नहीं करता, जिस पर आवेश स्थानांतरित होता है। वैद्युत-क्षेत्र के किसी भी बिन्दु पर स्थित आवेश की अपनी स्थितिज ऊर्जा होती है।

क्षेत्र के दिए हुए बिंदु पर **विभव** उस बिन्दु पर रखे गये इकाई धनावेश की स्थितिज ऊर्जा के बराबर मान वाली अदिष्ट राशि को कहते हैं। विभव शून्य-विभव वाले बिन्दु के चयन पर निर्भर करता है और इसका चयन ऐच्छिक हो सकता है। भौतिकी में अक्सर अनंत दूर स्थित बिन्दु के विभव को शून्य के बराबर मानते हैं। विद्युत-तकनीक में मानते हैं कि पृथ्वी की सतह का विभव शून्य होता है।

विद्युत-क्षेत्र के दो बिन्दुओं के विभव में अन्तर को **वोल्टता** (या **विभवांतर**, U) कहते हैं। सांख्यिक रूप से वोल्टता कार्य के बराबर होती है, जिसे वैद्युत बल इकाई धनावेश को एक बिन्दु से दूसरे तक लाने में सम्पन्न करते हैं।

विद्युत्स्थैतिक क्षेत्र में आवेश को स्थानांतरित करने में सम्पन्न कार्य है

$$A = QU. \qquad (4.7)$$

अ. प्र. में वोल्टता को **वोल्ट** (V) में व्यक्त करते हैं। 1V दो बिंदुओं के बीच का विभवांतर है, जब 1C धनावेश को एक बिंदु से दूसरे तक लाने में 1J कार्य संपन्न करता है।

जिस सतह पर हर बिन्दु का विभव एक जैसा होता है, उसे **संविभवी तल** कहते हैं। चित्र 34-36 में संविभवी तल डैश-रेखा द्वारा दिखाये गये हैं।

विद्युत्स्थैतिक क्षेत्र में बल-रेखाएँ संविभवी तलों के साथ लंब होती हैं। संविभवी तल पर आवेश को स्थानांतरित करने में वैद्युत बलों द्वारा संपन्न कार्य शून्य होता है।

यदि A व B—क्षेत्र के दो बिंदु हैं, तो बिंदु A पर क्षेत्र की तीव्रता और दोनों बिंदुओं के बीच का विभवांतर सन्निकट सूत्र

$$E=\frac{\Delta U}{\Delta l}$$

द्वारा जुड़े है। अधिक सही सूत्र है :

$$|\mathbf{E}|=-\lim_{\Delta l\to 0}\frac{\Delta U}{\Delta l}=-\frac{dU}{dl}, \qquad (4.8)$$

जहाँ ΔU=निकटस्थ बिन्दुओं A व B के बीच विभवांतर, Δl=इन बिन्दुओं से गुजरने वाले संविभवी तलों के बीच की दूरी (बल-रेखा पर)। राशि dU/dl को **विभव का नतन** कहते हैं।

यदि विद्युत-क्षेत्र समसर्वत्र (एकरस) है, अर्थात् क्षेत्र के हर बिंदु पर तीव्रता मान व दिशा में स्थिर है (जैसे चपटे धारित्र में), तो $E=-U/l$ होगी, जहाँ l=बल-रेखा के खंड की लम्बाई है।

अ. प्र. में क्षेत्र की तीव्रता वोल्ट प्रति मीटर (V/m) में व्यक्त होती है। 1 V/m ऐसे एकरस क्षेत्र की तीव्रता है, जिसमें बल-रेखा के 1 m लम्बे खण्ड के सिरों का विभवांतर 1V है।

धारिता. जब दो चालकों के बीच स्थित विद्युत-क्षेत्र की सभी बल-रेखाएँ एक चालक से शुरू होती हैं और दूसरे पर समाप्त होती हैं, तब इन चालकों को **धारित्र** कहते हैं और दोनों में से प्रत्येक चालक को **धारित्र का पत्तर** कहते हैं। साधारण धारित्र में पत्तरों पर आवेश की मात्राएँ समान होती है, पर उनके चिह्न विपरीत होते हैं।

धारित्र की **धारिता (विद्युत-धारिता)** किसी एक पत्तर के आवेश और दोनों पत्तरों के विभवांतर का अनुपात है, अर्थात्

$$C=\frac{Q}{U}. \qquad (4.9)$$

विद्युत-धारिता की इकाई फराड (F) है। 1F ऐसे धारित्र की धारिता

है, जिसके प्रत्येक पत्तर पर 1C आवेश होने पर पत्तरों का विभवांतर 1V होता है।

चालक की सतह की आकृति के अनुसार चपटे, बेलनाकार व वर्तुली (गोल) धारित्रों में भेद किया जाता है।

चपटे धारित्र की धारिता

$$C=\frac{\varepsilon_0\varepsilon S}{d}. \qquad (4.10)$$

है, जहाँ S=किसी एक पत्तर की सतह का क्षेत्रफल (यदि पत्तर आकार में असमान हैं; तो छोटे वाले का), d=पत्तरों की आपसी दूरी, ε=पत्तरों के बीच स्थित द्रव्य की पारवैद्युत वेधिता।

बेलनाकार धारित्र और समाक्षीय केबिल की धारिता :

$$C=\frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon l}{\ln(b/a)}, \qquad (4.11)$$

जहाँ b=बाह्य बेलन की त्रिज्या, a=आंतरिक बेलन की त्रिज्या, l=धारित्र की लम्बाई।

वर्तुली धारित्र की धारिता :

$$C=\frac{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}{\frac{1}{a}-\frac{1}{b}}, \qquad (4.12)$$

जहाँ a व b आन्तरिक व बाह्य वर्तुलों की त्रिज्याएं।

बिजली की दुतारी लाइन की धारिता :

$$C=\frac{\pi\varepsilon_0\varepsilon l}{\ln\frac{d}{a}}, \qquad (4.13)$$

जहाँ d=समांतर तारों के अक्षों की आपसी दूरी, a=उनकी त्रिज्याएँ, l=लम्बाई।

$C_1, C_2, C_3, \ldots, C_n$ धारिता वाले धारित्रों को समान्तर क्रम में जोड़ने पर कुल धारिता

$$C_{sam}=C_1+C_2+C_3+\ldots+C_n \qquad (4.14)$$

और शृंखल क्रम में जोड़ने पर

$$\frac{1}{C_{\text{shr}}}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}+\ldots+\frac{1}{C_n} \qquad (4.15)$$

आविष्ट धारित्र की ऊर्जा

$$W=\tfrac{1}{2}CU^2 \qquad (4.16)$$

व्योम में जहां विद्युत-क्षेत्र होता है, वहां ऊर्जा समाहृत रहती है। इकाई आयतन में वितरित ऊर्जा की मात्रा को **ऊर्जा का आयतनी घनत्व** w कहते हैं। तीव्रता E वाले एकरम क्षेत्र में ऊर्जा का आयतनी घनत्व

$$w=\tfrac{1}{2}\varepsilon_0\varepsilon E^2 \qquad (4.17)$$

है, जहां E=क्षेत्र की तीव्रता है।*

विद्युत-क्षेत्र में चालक व पृथक्कारी. विद्युत-क्षेत्र में रखे गये चालकों में विपरीत चिह्न के आवेश प्रेरित होते हैं। ये आवेश चालक की सतह पर इस प्रकार वितरित होते हैं कि चालक के भीतर विद्युत्स्थैतिक क्षेत्र की तीव्रता शून्य होती है और चालक की सतह संविभवी तल होती है।

क्षेत्र में रखा गया पृथक्कारी (पारविद्युक) ध्रुवित होता है। **ध्रुवण** का अर्थ है कि अणु में उपस्थित संरचनात्मक आवेश स्थानांतरित होकर मापांक में समान, पर विपरीत चिह्न वाले दो बिंदु-आवेशों के विद्युत-क्षेत्र जैसा एक

चित्र 37. वैद्युत द्विध्रुव।

क्षेत्र बना लेते हैं (दे. चित्र 35a)। विपरीत चिह्न वाले दो बिंदु-आवेश जैसा विद्युत-क्षेत्र रखने वाले आवेशों का व्यूह सामान्यतः **वैद्युत द्विध्रुव** कहलाता है (चित्र 37)।

*किसी मनमाने क्षेत्र के लिए "बिंदु पर ऊर्जा के घनत्व" की अवधारणा प्रयुक्त होती है:

$$w=\lim_{\Delta V\to 0}\frac{\Delta W}{\Delta V}$$

यहां ΔW=सिकुड़ कर बिंदु-रूप धारण करने की प्रवृत्ति वाले आयतन ΔV में संकेंद्रित ऊर्जा। यदि E का अर्थ इसी बिंदु में तीव्रता माना जाये, तो सूत्र (4.17) मनमाने क्षेत्र के लिये भी सही होगा।

द्विध्रुव एक सदिष्ट राशि द्वारा लंछित होता है, जिसे **द्विध्रुव का विद्युताघूर्ण** ($\mathbf{p}_i$) कहते हैं और

$$\mathbf{p}_i=Q\mathbf{l} \qquad (4.18)$$

जहां $\mathbf{l}$=आवेशों के बीच की दूरी है। सदिश $\mathbf{p}_i$ की दिशा द्विध्रुव के ऋणावेश से धनावेश तक खींचे गये त्रिज्य सदिश की दिशा के साथ संपात करती है।

पूरे द्विध्रुव के ध्रवण का मूल्यांकन सदिष्ट राशि $\mathbf{P}$ की सहायता से किया जाता है, जो इकाई आयतन में उपस्थित सभी विद्युताघूर्णों के सदिष्ट योग के बराबर होता है, अर्थात्

$$\mathbf{P}=\sum_i \mathbf{p}_i/V.$$

इस राशि को **ध्रुवणता** कहते हैं। पारविद्युक की ध्रुवणता $\mathbf{P}$ और विद्युत-क्षेत्र का स्थानांतरण $\mathbf{D}$ निम्न संबंध रखते हैं:

$$\mathbf{D}=\varepsilon_0\mathbf{E}+\mathbf{P} \qquad (4.19)$$

कुछ पारविद्युकों के अणु विद्युत-क्षेत्र की अनुपस्थिति में भी द्विध्रुव होते हैं। ऐसे द्रव्यों के ध्रुवण का कारण आण्विक द्विध्रुवों का क्षेत्र की दिशा में उन्मुख हो जाना है।

सेग्नेटोविद्युक. सेग्नेटोविद्युक शब्द सेग्नेट लवण (Seignete salt) नाम से बना है, जिसमें पहली बार स्वतःस्फूर्त ध्रुवण की संवृति ज्ञात हुई थी।[1] सेग्नेटोविद्युक को विद्युत-क्षेत्र की अनुपस्थिति में भी नन्हें (सूक्ष्म-दर्शीय) व्योमों में बांटा जा सकता है, जो अपना विद्युताघूर्ण रखते हैं। स्वतःस्फूर्त ध्रुवण के इन क्षेत्रों को **प्रांगन** (domain) कहते हैं (दे. आगे भी, पृ. 186)। क्षेत्र की अनुपस्थिति में विद्युताघूर्णों की दिशाएं अस्त-व्यस्त होती हैं और इसीलिए पूरे सेग्नेटोविद्युक का विद्युताघूर्ण शून्य के बराबर होता है। बाह्य विद्युत-क्षेत्र में सेग्नेटोविद्युक कुल मिला कर प्रांगनों के ध्रुवणों

1. सेग्नेट लवण टार्टरिक अम्ल (dihydroxybutanedioic acid): HOOC. CHOH. CHOH. COOH) का एक लवण पोटैशियम-सोडियम टार्टरेट है, जिसे रोशेल लवण (Rochelle salt) भी कहते हैं। स्वतःस्फूर्त ध्रुवण का गुण अन्य लवणों में भी है, जैसे बेरियम टिटानेट में। इन सभी लवणों को फेरोविद्युक या लौह विद्युक कहा जाता है। —अनु.

की दिशाओं में परिवर्तन के कारण ध्रुवित हो जाता है। क्षेत्र का प्रभाव समाप्त हो जाने पर अवशिष्ट ध्रुवण रह जाता है।

सेग्नेटोविद्युकों की पारवैद्युत वेधिता के मान बहुत बड़े होते हैं (कभी-कभी तो कई हजार के क्रम में होते है)। यह विद्युत-क्षेत्र की तीव्रता पर निर्भर करता है।

तापक्रम विशेष मान से अधिक होने पर तापीय गति प्रांगनों को नष्ट कर देती है, जिसके कारण सेग्नेटोविद्युक-गुण लुप्त हो जाते हैं। तापक्रम का यह मान **क्यूरी-बिंदु** कहलाता है।

दाब-वैद्युत प्रभाव. यांत्रिक विकृति के कारण कुछ क्रिस्टलों की सतहों पर विशेष दिशाओं में विपरीत चिह्नों के विद्युतावेश इकट्ठे हो जाते हैं और क्रिस्टल के भीतर विद्युत-क्षेत्र उत्पन्न हो जाता है। विकृति की दिशा बदलने पर आवेशों के चिह्न भी बदल जाते हैं। इस संवृति को **दाब-वैद्युत प्रभाव** कहते हैं। दाब-वैद्युत प्रभाव उलट भी सकता है, अर्थात् यदि क्रिस्टल को विद्युत-क्षेत्र में रखा जाये, तो उसकी रैखिक मापें बदल सकती हैं। उलटे दाब-वैद्युत प्रभाव का उपयोग पराध्वनि उत्पन्न करने में होता है।

दाब-वैद्युत प्रभाव में उत्पन्न आवेश निम्न संबंध द्वारा निर्धारित होता है :

$$Q = d_{11}F, \qquad (4.20)$$

जहां F = विकृति उत्पन्न करने वाले बल की मात्रा, d_{11} = दिये हुए क्रिस्टल के लिए स्थिर संगुणक, जिन्हें **दाब-वैद्युत मोडुल** कहते हैं (दे. सारणी 77); d_{11} क्रिस्टलीय जाली के प्रकार, विकृति के प्रकार, और तापक्रम पर निर्भर करता है।

सारणी व ग्राफ

सारणी 72. **पार्थिव वातावरण में वैद्युत क्षेत्र**

ऊँचाई, km	0	0.5	1.5	3	6	12
तीव्रता, V/m	130	50	30	20	10	2.5

टिप्पणी :—1. गरजने वाले बादल पर 10-20 C का आवेश होता है, जो अलग-अलग परिस्थितियों में 300 C तक पहुँचता है।

2. पृथ्वी के आवेश का औसत सतही घनत्व – 1.15 nC/m^2 के बराबर है। पृथ्वी पर $5.7 \cdot 10^5$ C का ऋण आवेश होता है।

सारणी : 73. **विद्युत-पृथक्कारी द्रव्य**

(ε = पारवैद्युत वेधिता, E_{we} = वेधक तीव्रता, ρ' = घनत्व, ρ = विशिष्ट प्रतिरोध)

द्रव्य	ε	E_{we}, MV/m	ρ', Mg/m^3	ρ, $\Omega \cdot cm$
अबरक, फ्लोगोपाइट	4-5.5	60-125	2.5-2.7	10^{13}-10^{17}
,, ,, मुस्कोवीट	4.5-8	50-200	2.8-3.2	—
एबोनाइट (RP)	4-4.5	25	1.3	1×10^{18}
एस्कापोन (P)	2.7-3	36	—	—
अंबर	2.7-2.9	20-30	1.06-1.11	1×10^{18}
ऐस्बेस्टस	—	2	2.3-2.6	2×10^4
काँच	4.10	20-30	2.2-4.0	10^{11}-10^{14}
कार्बोलाइट (P)	—	10-14.5	1.2-1.3	—
गुट्टा-पेर्चा	4	15	0.96	2×10^9
गेटीनैक्स (परतदार पृथकन) (P)	5-6.5	10-30	1.3	—
चपड़ा (शल्क)	3.5	50	1.02	1×10^{16}
टिकोंड (C)	25-80	15-20	3.8-3.9	—
टेक्स्टोलाइट	7	2-8	1.3-1.4	—
परापोर्सलेन (C)	6.3-7.5	15-30	2.6-2.9	3×10^{14}
पैराफीन	2.2-2.3	20-30	0.4-0.9	3×10^{18}
पोर्सलेन	6.5	20	2.4	—
पोलीविनील क्लोराइड	3.1-3.5	50	1.38	—
पोलीस्टेरीन	2.2-2.8	25-50	1.05-1.65	5×10^{15}-5×10^{17}
प्रेसबोर्ड	3-4	9-12	0.9-1.1	1×10^9
प्लेक्सी काँच	3.0-3.6	18.5	1.2	—
फाइबर बोर्ड	2.5-8	2-6	1.1-1.94	5×10^9
फ्लोरोप्लास्टिक-3	2.5-2.7	—	—	2×10^{10}
बिटुमेन	2.6-3.3	6-15	1.2	—
बैकेलाइट (फेनिल रेजीन)	4-4.6	10-40	1.2	—
भोज (लकड़ी), सूखी	3-4	40-60	0.7	—
मोम	2.8-2.9	20-35	0.96	2×10^{10}-2×10^{15}
रबर (नर्म)	2.6-3	15-25	1.7-2.0	4×10^{13}

(सारणी 73, समापन)

द्रव्य	ε	E_{we}, MV/m	ρ′, Mg/m³	ρ, Ω·cm
रेडियो-पोर्सलेन (C)	6.0	15-20	2.5-2.6	—
राजीन	3.5	—	1.1	5×10^{16}
विनील प्लास्टिक (P)	4.1	15	—	—
संगमरमर	8-10	6-10	2.7	1×10^{10}
सिल्क	4-5	—	—	—
सेलुलायड	3-4	30	—	2×10^{10}
स्लेट	6-7	5-14	2.6-2.9	10^{8}

टिप्पणी :—1. वेधक तीव्रता अधिकतम अनुमत तीव्रता है; इससे अधिक तीव्रता होने पर पारविद्युक अपने विद्युत-पृथक्कारी गुण खो देता है।

2. कोष्ठक में दिये गये वर्ण : P—प्लास्टिक, C—चीनी मिट्टी, RP—रबर प्लास्टिक।

3. पारवैद्युत वेधिता के प्रदत्त मान 10-20°C के लिये हैं। ठोस पदार्थों की पारवैद्युत वेधिता तापक्रम के साथ बहुत कम बदलती है; सिर्फ सेग्नेटो-विद्युक इसके अपवाद है (दे. चित्र 38)।

4. विशिष्ट प्रतिरोध के बारे में देखें पृ. 144।

सारणी 74. शुद्ध द्रवों की पारवैद्युत वेधिता

द्रव्य	तापक्रम, °C						
	0	10	20	25	30	40	50
एथिल अल्कोहल	27.88	26.41	25.00	24.25	23.52	22.16	20 87
एथिल ईथर	4.80	4.58	4.33	4.27	4.15	—	—
एसीटोन	23.3	22.5	21.4	20.9	20.5	19.5	18.7
कार्बन टेट्रा क्लोराइड	—	—	2.24	2.23	—	2.20	2.18
किरासन	—	—	2.0	—	—	—	—
ग्लीसरीन	—	—	56.02	—	—	—	—
पानी	87.83	83.86	80.08	78.25	76.47	73.02	69.73
बेंजोल	—	2.30	2.29	2.27	2.26	2.25	2.22

टिप्पणी :—न्यून मात्रा में अशुद्धियां पारवैद्युत वेधिता के मान को अधिक प्रभावित नही करती।

सारणी 75. गैसों की पारवैद्युत वेधिता

(18 °C व सामान्य दाब पर)

द्रव्य	ε	द्रव्य	ε
आक्सीजन	1.00055	हवा	1.00059
कार्बन डायक्साइड	1.00097	हाइड्रोजन	1.00026
जलवाष्प	1.0078	हीलियम	1.00007
नाइट्रोजन	1.00061		

टिप्पणी :—गैसों की पारवैद्युत वेधिता तापक्रम-वृद्धि के साथ घटती है और दाब-वृद्धि के साथ बढ़ती है।

सारणी 76. सेग्नेटोवैद्युत क्रिस्टलों के गुण

(T_C—क्यूरी बिंदु, p_s—स्वतःस्फूर्त ध्रुवण, ε—पारवैद्युत वेधिता)

क्रिस्टल	T_C, K	p_s, nC/m²	ε
$NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$ सेग्नेट लवण	296 (ऊपरी) 258 (निचला)	2.6	—200
$LiNH_4(C_4H_4O_6) \cdot H_2O$	106	2.1	—
KH_2PO_4	123	52.8	42
KH_2AsO_4	95.6	—	54
$NH_4H_2PO_4$	148	—	56
$BaTiO_3$	391	158	3000
KNbO	708	257	—
$LiNbO_3$	—1470	500	84

टिप्पणी :—1. कुछ सेग्नेटोविद्युकों के गुण विशेष तापक्रम-अतरालों में ही प्रकट होते है। इन स्थितियों में क्यूरी-तापक्रम के उच्चतम व निम्नतम मान दिये गये है।

2. पारवैद्युत वेधिता के निकटवर्ती मान दिये गये है।

सेग्नेट लवण और बेरियम टिटानेट की पारवैद्युत वेधिता

चित्र 38. रोशेल लवण के अस्थिर पतरे की पारवैद्युत वेधिता की तापक्रम पर निर्भरता। दोनों वक्र क्षेत्र की भिन्न तीव्रताओं के लिये है।

चित्र 39. क्षेत्र की तीव्रता पर बेरियम टाइटेनेट और रोशेल लवण की पारवैद्युत वेधिता की निर्भरता (20 °C पर)।

सारणी 77. **क्रिस्टलों के दाब-वैद्युत मोडुल**

क्रिस्टल	d_{ij}, pC/N	क्रिस्टल	d_{ij}, pC/N
अमोनियम फास्फेट	48 (d_{36})	पोटाशियम फास्फेट	21 (d_{36})
कैडमियम सल्फाइड	14 (d_{15})	बेरियम टिटानेट	390 (d_{15})
क्वार्टस	2.31 (d_{11})	रोशेल लवण	345 (d_{14})
छली जस्ता*	3.3 (d_{14})	लीथियम नायोबेट	68 (d_{15})
टूर्मेलाइन	3.8 (d_{15})	लीथियम सल्फेट	18.3 (d_{22})

टिप्पणी:—कुछ क्रिस्टलों के मोडुल विकृति (विरूपण) की दिशा पर निर्भर करते हैं; इनके लिये मोडुल का महत्तम मान दिया गया है (कोष्ठकों में मोडुल के तदनुरूप प्रतीक दिये गये है)।

* जिक ब्लेंड या प्राकृतिक जिंक सल्फाइड, जो सीसे के साधारण अयस्क जैसा दिखता है, पर उसमें सीसा नहीं होता। —अनु.

B. स्थिर विद्युत-धारा

मूल अवधारणाएं और नियम

1. धातुओं में धारा

विद्युत-धारा का बल और विद्युवाहक बल. आवेश-वाहकों की कोई भी सिलसिलेवार गति **विद्युत-धारा** कहलाती है। धातुओं में ऐसे वाहक एलेक्ट्रोन होते हैं। ये ऋणाविष्ट कणिकाएं हैं, जिनका आवेश प्राथमिक आवेश के बराबर होता है। धारा की दिशा औपचारिकत: ऋणावेशों की गति की दिशा के विपरीत मानी जाती है। यदि क्षण t से क्षण $t+\Delta t$ समय में चालक के अनुप्रस्थ-काट मे विद्युत की मात्रा ΔQ गुजरती है, तो सीमा

$$I=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta Q}{\Delta t}=\frac{dQ}{dt} \qquad (4.21)$$

क्षण t पर **धारा का बल** कहलाती है।

स्थिर धारा में चालक के अनुप्रस्थ काट से समय के समान अंतरालों में विद्युत की समान मात्रा गुजरती है।

अ. प्र. में धारा-बल की इकाई **ऐंपियर** (A) है। धारा-बल 1 A होने पर चालक के अनुप्रस्थ काट से प्रति सेकेंड 1 C आवेश गुजरता है। ऐंपियर की पूर्ण परिभाषा पृष्ठ 175 पर दी गयी है।

धारा का घनत्व j सदिष्ट राशि को कहते हैं, जिसका मापांक धारा-बल I और चालक के अनुप्रस्थ काट के क्षेत्रफल S का अनुपात है (अनुप्रस्थ काट आवेशों की गति की दिशा के अभिलंब लिया जाता है) :

$$j = I/S. \qquad (4.22)$$

सदिश **j** की दिशा धनावेश-वाहकों के वेग के सदिश की दिशा के साथ संपात करती है।

धारा के घनत्व की इकाई ऐंपियर प्रति वर्ग मीटर (A/m^2) मानी जाती है, 1 A/m^2 धारा का ऐसा घनत्व है, जिसमें वाहकों की गति की दिशा के अभिलंब स्थित अनुप्रस्थ काट के 1 m^2 क्षेत्रफल से होकर धारा 1 A बल से गुजरती है।

धारा का घनत्व :

$$\mathbf{j} = ne\langle \mathbf{v} \rangle, \qquad (4.23)$$

जहां n=इकाई आयतन में आवेश-वाहकों की संख्या, e=एक वाहक का आवेश, $\langle \mathbf{v} \rangle$=वाहकों की क्रमबद्ध (सिलसिलेवार) गति का औसत वेग।

एलेक्ट्रोनों की चंचलता u सांख्यिक तौर पर उनकी क्रमबद्ध गति के औसत वेग के बराबर होती है, जिसे वे इकाई तीव्रता वाले क्षेत्र में प्राप्त करते हैं। (4.23) से निष्कर्ष निकलता है कि,

$$\mathbf{j} = neu\mathbf{E} = \sigma \mathbf{E}, \qquad (4.24)$$

जहां **E**=चालक के भीतर विद्युत-क्षेत्र की तीव्रता, $\sigma = neu$=**विशिष्ट** चालकता (दे. पृ. 144)।

जिन चालकों में धारा स्वतंत्र एलेक्ट्रोनों के स्थानांतरण से बनती है, वे प्रथम प्रकार के चालक (या एलेक्ट्रोनी चालक) कहलाते हैं। **धातुओं की** गणना इन्हीं में होती है। **यदि भिन्न-भिन्न चिह्नों व मात्राओं वाले आवेशों** के वाहक धारा बना रहे हैं, तो धारा का कुल घनत्व प्रत्येक चिह्न व मात्रा वाले आवेश के वाहकों के लिए कलित घनत्वों के योग के बराबर होगा :

$$\mathbf{j} = \sum_i n_i e_i v_i \qquad (4.25)$$

चालक में धारा प्राप्त करने के लिए उसके सिरों पर विभवांतर बनाये रखना आवश्यक है। विभवांतर बनाये रखने वाला उपकरण **धारा का स्रोत** (या **जनित्र**) कहलाता है। स्रोत के सिरस्थ, जिनके सहारे स्रोत को भक्षी[1] से जोड़ा जाता है, ध्रुव कहलाते हैं। अधिक विभव वाला ध्रुव **धन ध्रुव** कहलाता है और कम विभव वाला **ऋण ध्रुव** कहलाता है। धारा-स्रोतों में ऊर्जा के ऐसे रूप विद्युत-ऊर्जा में रूपांतरित होते हैं, जिनका विद्युत-क्षेत्र से कोई वास्ता नहीं होता। असंवृत धारा-स्रोत के ध्रुवों पर विभवांतर बनाये रखने के लिए ऐसे बलों का उपयोग किया जाता है, जिनकी प्रकृति वैद्युत बलों से भिन्न होती है। ऐसे बलों को **परार** (पराया) या **अवैद्युत** (अविद्युचुंबकीय) कहते हैं। स्रोत के भीतर क्रियाशील परार बल आवेशों को वैद्युत बलों की कार्य-दिशा की विपरीत दिशा में वहन करते हैं : वैद्युत बल आवेशों को स्रोत में धन से ऋण ध्रुव की ओर वहन करते हैं और परार बल—ऋण से धन ध्रुव की ओर।

स्रोत का विद्युवाहक बल (**विवाब**, e.m.f.) परार बलों द्वारा इकाई धनावेश को वहन करने में संपन्न कार्य के सांख्यिक मान के बराबर होता है। सांख्यिक रूप से स्रोत का विवाब असंवृत स्रोत के ध्रुवों के विभवांतर के बराबर होता है।

विवाब को वोल्टता की इकाइयों (वोल्ट) में ही नापते हैं।

विवाब विद्युविश्लेषकों में आयनों के विसरण (दे. पृ. 150), विद्युचुंबकीय प्रेरण (दे. पृ. 180) और अर्धचालकीय प्रकाश-वैद्युत बैटरी पर प्रकाश डालने (दे. पृ. 128) आदि से उत्पन्न होता है।

वैद्युत परिपथ में धारा-स्रोत, योजक तार, और ऐसे उपकरण आते हैं, जिनमें धारा कार्य संपन्न करती है (चित्र 40)। परिपथ में कार्य अंततः स्रोत के विवाब द्वारा संपन्न होता है।

चित्र 40. एक वैद्युत परिपथ का आरेख।

ओम का नियम. परिपथ के उस भाग में, जहां कोई परार बल क्रियाशील नहीं होता,

[1] विद्युत-भक्षण से चलने वाले उपकरण, जैसे बल्ब आदि। —अनु.

धारा-बल चालक के सिरों की तीव्रता (वोल्टता) का समानुपाती होता है, अर्थात्

$$I=\frac{U}{r} \qquad (4.26)$$

इस संबंध में राशि $1/r$ समानुपातिकता का संगुणक है और इसे **चालकता** कहते हैं। राशि r **वैद्युत प्रतिरोध** कहलाती है।

अ. प्र. में प्रतिरोध की इकाई ओम (Ω) है। 1 Ω ऐसे चालक का प्रतिरोध है, जिसके सिरों पर तीव्रता 1 V होने पर उसमें 1 A की धारा निश्चित हो जाती है।

स्थिर अनुप्रस्थ काट वाले चालक का प्रतिरोध :

$$r=\rho\frac{l}{S}, \qquad (4.27)$$

जहां ρ=विशिष्ट प्रतिरोध या प्रतिरोधिता (इकाई अनुप्रस्थ काट वाले चालक की इकाई लंबाई में विद्युत-प्रतिरोध), l=चालक की लंबाई, S=अनुप्रस्थ काट का क्षेत्रफल। ρ को ओम-मीटर (Ω·m) में व्यक्त करते हैं। राशि $\sigma=1/\rho$ **विशिष्ट चालकता** कहलाती है। तापक्रम बढ़ाने पर अधिकतर धातुओं का विशिष्ट प्रतिरोध और भी अधिक हो जाता है। प्रतिरोध में इस प्रकार का परिवर्तन सन्निकट रूप से निम्न संबंध द्वारा निरूपित हो सकता है :

$$\rho_t=\rho_0(1+\alpha t), \qquad (4.28)$$

जहां ρ_t =तापक्रम t पर विशिष्ट प्रतिरोध, ρ_0=0°C पर विशिष्ट प्रतिरोध, **α=प्रतिरोध का तापक्रमी गुणांक** (जो चालक को 1°C अधिक गर्म करने पर प्रतिरोध में होने वाले परिवर्तन में आरंभिक प्रतिरोध से भाग देने पर प्राप्त सांख्यिक मान के बराबर होता है)। विशेष कम तापक्रमों पर कुछ चालकों का विशिष्ट प्रतिरोध छलांगें मारता हुआ घटने लगता है और शून्य के बराबर हो जाता है। इस संवृत्ति को **अतिचालकता** कहते हैं।

प्रतिरोधों को शृंखल क्रम में जोड़ने पर कुल प्रतिरोध

$$R_{shr}=R_1+R_2+R_3+\ldots+R_n \qquad (4.29)$$

होता है और समांतर क्रम में जोड़ने पर

$$\frac{1}{R_{sam}}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}+\ldots+\frac{1}{R_n} \qquad (4.30)$$

होता है।

परिपथ के जिस भाग में विवाब क्रियाशील होता है, उसके लिए ओम के नियम का रूप है

$$I=\frac{U+\mathcal{E}}{R}, \qquad (4.31)$$

जहां R=विचाराधीन भाग का प्रतिरोध, U=इस भाग की तीव्रता (वोल्टता), $\mathcal{E}$=विद्युवाहक बल, I= धारा-बल। ध्यान दें कि इस सूत्र में U व $\mathcal{E}$ का चिह्न धन या ऋण में से कोई भी हो सकता है। विवाब धनात्मक माना जाता है, जब वह विभव को धारा की दिशा में बढ़ाता है (धारा स्रोत के ऋण से धन की ओर बहती है); तीव्रता (वोल्टता) को धनात्मक तब मानते हैं, जब स्रोत के भीतर धारा विभव-ह्रास की दिशा में बहती है (धन से ऋण की ओर)। उदाहरणार्थ, संचायक को आविष्ट करते वक्त (चित्र 41) आवेशक धारा

चित्र 41. संचायक का आवेशन।

$$I_a=\frac{U-\mathcal{E}_{san}}{R_{san}} \qquad (4.32)$$

होगी, जहां U=आविष्ट करते वक्त स्रोत के सिरस्थों पर तीव्रता, $\mathcal{E}_{san}$ =संचायक का विवाब, R_{san}=संचायक का प्रतिरोध (योजक तारों का प्रतिरोध उपेक्षित है)। इसी स्थिति में भाग ADB के लिए

$$i_a=\frac{\mathcal{E}_s-U}{R_{an}}, \qquad (4.33)$$

जहां $\mathcal{E}_s$=स्रोत का विवाब, R_{an}= स्रोत का आंतरिक प्रतिरोध।

संवृत अविशाखित परिपथ में (इस स्थिति में $U=0$) संबंध (4.33) को निम्न रूप में लिखा जाता है :

$$i=\frac{\mathcal{E}}{R+R_{an}}, \qquad (4.34)$$

जहां R=परिपथ का वाह्य प्रतिरोध है।

विद्युत-धारा का कार्य. परिपथ के किसी खंड में स्थिर धारा द्वारा संपन्न कार्य :

$$A = IUt, \qquad (4.35)$$

जहां t = धारा बहने का समय, U = विचाराधीन खंड पर तीव्रता, I = धारा-बल ।

यदि खंड पर विवाब अनुपस्थित है, तो चालक की आंतरिक ऊर्जा में परिवर्तन (ताप-विसर्जन) से संबंधित कार्य, जिसे धारा संपन्न करती है,

$$A = \frac{U^2}{R} t. \qquad (4.36)$$

आंतरिक ऊर्जा में परिवर्तन से संबंधित कार्य (खंड पर विवाब उपस्थित हो या अनुपस्थित, दोनों ही हालतों में) :

$$A = I^2Rt. \qquad (4.37)$$

अ. प्र. में कार्य (और ऊर्जा की भी) इकाई जूल (J) है; 1 V तीव्रता वाले खंड में 1 A की स्थिर धारा द्वारा 1 s में संपन्न कार्य को 1 J मानते हैं ।

किर्खहोफ के नियम. विशाखित परिपथ के लिए धारा, तीव्रता व विवाब का कलन किर्खहोफ के नियमों के आधार पर होता है ।

चित्र 42. धाराओं का संगम (जंकशन) ।

प्रथम नियम : *किसी विशाखन-बिंदु पर संसृत परिपथ-खंडों में धारा-बलों का* **बीजगणितीय योग** *शून्य के बराबर होता है ।* उदाहरणार्थ (चित्र 42 में) :

$$I_1 + I_2 + I_3 - I_4 = 0. \qquad (4.38)$$

दूसरा नियम : *विशाखित परिपथ के किसी संवृत आकृति में धारा-बलों व उनके तदनुरूप प्रतिरोधों के गुणनफलों का बीजगणितीय योग आकृति के सभी विवाब के बीजगणितीय योग के बराबर होता है ।*

उपरोक्त योग ज्ञात करते वक्त उन धाराओं को धनात्मक मानना चाहिए, जिनकी दिशाएँ आकृति का चक्कर लगाने के लिए औपचारिकतः चुनी गयी दिशा के साथ संपात करती है । धनात्मक उन विवाब को मानते हैं, जो

चित्र 43. बहुशाखी परिपथ से अलग की गयी एक आकृति ।

विभव को आकृति का चक्कर लगाने की दिशा में ऊँचा करते हैं (अर्थात् चक्कर लगाने की दिशा स्रोत के धन ध्रुव से ऋण ध्रुव की दिशा के साथ संपात करती है) । उदाहरण के लिये (चित्र 43 में) :

$$I_1R_1 + I_2R_2 - I_3R_3 = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_3. \qquad (4.39)$$

समान स्रोतों को शृंखल क्रम में जोड़ने पर

$$I(nR_1 + R) = n\mathcal{E} \qquad (4.40)$$

जहां n = स्रोतों की संख्या, R_1 = किसी एक स्रोत का आंतरिक प्रतिरोध, R = बाह्य प्रतिरोध, $\mathcal{E}$ = एक स्रोत का विवाब ।

समान तरह के n स्रोतों को समांतर क्रम में जोड़ने पर

$$I\left(R + \frac{R_1}{n}\right) = \mathcal{E}. \qquad (4.41)$$

2. विद्युविश्लेषकों में धारा

विद्युविश्लेषक चालक (या सिर्फ **विद्युविश्लेषक**) जल (या अन्य घोलकों) में अम्लों, भस्मों व लवणों के घोलों को कहते हैं । पिघले हुए लवणों में भी विद्युत-चालन का गुण होता है । विद्युविश्लेषकों में आवेशों का

वहन आयन करते हैं। **आयन** धनाविष्ट या ऋणाविष्ट अणु-खंडों (परमाणुओं, मूलों या स्वयं अणुओं) को कहते हैं।

विद्युविश्लेषक में वैद्युत क्षेत्र उसमें डूबे हुए धारा-वाही पत्तरों के बीच उत्पन्न होता है; इन पत्तरों को **विद्युद** (एलेक्ट्रोड) कहते हैं। विद्युद विवाब-स्रोत के ध्रुवों से जुड़े होते हैं। धन ध्रुव से जुड़ा हुआ विद्युद **ऊँचद** (ऐनोड) कहलाता है और ऋण ध्रुव से जुड़ा हुआ – **नीचद** (कैथोड)। विद्युत-क्षेत्र में नीचद की ओर स्थानांतरित होने वाले धनात्मक आयन **नीचायन** (कैटायन) कहलाते हैं; उच्चद की ओर स्थानांतरित होने वाले ऋणात्मक आयन **ऊँचायन** (ऐनायन) कहलाते हैं।

दोनों चिह्नों वाले आयनों से उत्पन्न धारा का घनत्व :

$$j = n_+ q_+ \langle v_+ \rangle + n_- q_- \langle v_- \rangle, \qquad (4.42)$$

जहां n_+, $\langle v_+ \rangle$—नीचायनों की सांद्रता, और उनकी क्रमबद्ध गति का औसत वेग; q_+=एक नीचायन का आवेश; n_-, $\langle v_- \rangle$—ऊँचायनों की सांद्रता, और उनकी क्रमबद्ध गति का औसत वेग; q_-=एक ऊँचायन का आवेश।

आयनों की चंचलता सांख्यिक रूप से क्रमबद्ध गति के औसत वेग के बराबर होती है, जिसे आयन इकाई तीव्रता वाले क्षेत्र में प्राप्त करता है : $u_+ = \langle v_+ \rangle / E$ व $u_- = \langle v_- \rangle / E$

आयनों की चंचलता u_+ व u_- द्वारा धारा के घनत्व को व्यक्त करने पर

$$j = (n_+ u_+ q_+ + n_- u_- q_-)\ E, \qquad (4.43)$$

जहां E=विद्युत-क्षेत्र की तीव्रता। ओम का नियम विद्युविश्लेषकों के लिए भी सत्य है।

विद्युविश्लेषकों (या पिघले हुए लवणों) से होकर धारा के गुजरने पर उनकी रसायनिक संरचना बदल जाती है और विभिन्न उत्पाद अलग हो कर विद्युदों पर जमा हो जाते हैं। इसी संवृत्ति को **विद्युविश्लेषण** कहते हैं।

फैराडे का प्रथम नियम. *विद्युविश्लेषण में विद्युद पर पृथक्कृत पदार्थ का द्रव्यमान विद्युविश्लेषक से गुजरने वाले विद्युत की मात्रा Q का समानुपाती होता है :*

$$m = kQ. \qquad (4.44)$$

समानुपातिकता का संगुणक k सांख्यिक रूप से इकाई मात्रा विद्युत के गुजरने

पर पृथक होने वाले पदार्थ के द्रव्यमान के बराबर होता है। इस संगुणक को दिये हुए पदार्थ का **विद्युरसायनिक तुल्यांक** कहते हैं।

फैराडे का दूसरा नियम. *दिये हुए पदार्थ का विद्युरसायनिक तुल्यांक उसके रसायनिक तुल्यांक μ/n का समानुपाती होता है :*

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{\mu}{n}; \qquad (4.45)$$

रसायनिक तुल्यांक द्रव्यमान की एक गैरप्रणालिक इकाई है, जो दिये हुए पदार्थ के मोलीय द्रव्यमान μ और उसकी संयुज्यता n के अनुपात के बराबर होती है। स्थिरांक F को **फैराडे-संख्या** (या **फैराडे-स्थिरांक**) कहते हैं; $F = 96\ 500$ C/mole। जब किन्हीं भी दो विद्युदों से फैराडे की संख्या के बराबर आवेश गुजरता है, तब प्रत्येक विद्युद पर पदार्थ का μ/n द्रव्यमान पृथक होता है।

गैल्वेनीक सेल. विद्युविश्लेषक में डूबे हुए विद्युद और घोल के बीच कोई विभवांतर स्थापित हो जाता है, जिसे दिये हुए घोल में दिये हुए विद्युद का **विद्युरसायनिक विभव** कहते हैं।

आयनों की मानक सांद्रता वाले घोलों में धातुओं के विद्युरसायनिक विभव के मानों को **मानक विभव** कहते हैं। ऐसी सांद्रता होने पर विद्युरसायनिक विभव सिर्फ धातुओं के प्रकार पर निर्भर करता है। मानक विभव हाइड्रोजन-विद्युद के सापेक्ष निर्धारित किया जाता है। हाइड्रोजन-विद्युद प्लैटिनम का हाइड्रोजन से संतृप्त पत्तर होता है, जो आयनों की 2 mol/lit सांद्रता वाले गंधकाम्ल के जलीय घोल में आंशिक तौर पर डूबा रहता है।

विद्युविश्लेषक में दो विद्युदों को डुबाने पर उनके बीच विभवांतर स्थापित होता है, जो विद्युदों के मानक विद्युरसायनिक विभवों के अंतर के बराबर होता है। ऐसा विद्युविश्लेषक, जिसमें दो भिन्न प्रकार के विद्युद डूबे होते हैं, **गैल्वेनिक सेल** कहलाता है (जैसे वोल्ट की बैटरी, जो गंधकाम्ल के जलीय घोल में तांबे और जस्ते के पत्तरों को डुबाने से बनती है)।

संचायक भी गैल्वेनिक सेल ही होते हैं, जिसके विद्युद ऐसे धातुओं से बनाये जाते हैं, जो अपने आरंभिक गुण पुनः प्राप्त कर लेते हैं; इसके लिए सेल में उसे काम लाते वक्त उसमें बहने वाली धारा की विपरीत दिशा में विद्युत-धारा प्रवाहित करनी पड़ती है। सेल को काम लाते वक्त उसमें बहने वाली धारा निरावेशक धारा कहलाती है और उसकी विपरीत दिशा में

बहाई जाने वाली धारा **आवेशक धारा** कहलाती है। दी हुई परिस्थितियों (तापक्रम, निरावेशन धारा, आरंभिक वोल्टता) में संचायक से विद्युत की जितनी मात्रा प्राप्त हो सकती है, उसे संचायक की धारिता कहते हैं और उसे कूलंब में व्यक्त करते हैं।

3. गैसों में विद्युत-धारा

गैसों में विद्युत-धारा बनने का कारण उनमें उपस्थित आयन और मुक्त एलेक्ट्रोन होते हैं। गैसों का आयनन (आयनीकरण) ऐसी प्रक्रिया है, जिसमें एलेक्ट्रोन उदासीन (आवेशहीन) अणुओं से अलग हो जाते हैं और उनका एक भाग अन्य उदासीन अणुओं व परमाणुओं के साथ संयुक्त हो जाता है। अणु या परमाणु से एलेक्ट्रोन के अलग होने में संपन्न कार्य **आयनन-कार्य** कहलाता है (इसे **आयनन का विभव** भी कहते हैं)।

आयनन-कार्य को **एलेक्ट्रोन-वोल्ट** (eV) में नापने की प्रथा है; 1 eV ऊर्जा की वह मात्रा है, जिसे एलेक्ट्रोन 1 V विभवांतर वाले क्षेत्र से गुजरने में प्राप्त करता है।

धातुओं व द्रवों की तरह गैसों में भी धारा का घनत्व आवेशवाही आयनों की सांद्रता, उनकी चंचलता और उनके आवेशों की मात्रा द्वारा निर्धारित किया जाता है। पर चूंकि गैस में आयनों की सांद्रता क्षेत्र की तीव्रता पर निर्भर करती है और आयनों का वितरण गैस द्वारा छेके गये व्योम में असमान रहता है, इसलिए गैसीय विद्युचालक अधिकांशतः ओम के नियम का पालन नहीं करते।

गैसों में दो प्रकार की चालकता होती है : अस्वपोषित और स्वपोषित। **अस्वपोषित चालकता** तब प्राप्त होती है, जब गैस में आयन प्रयुक्त विद्युत-क्षेत्र के प्रभाव से नहीं, बल्कि अन्य कारणों (जैसे एक्स-किरणों या ताप) के प्रभाव से बनते हैं। जब आयन विद्युदों के बीच प्रयुक्त विद्युत-क्षेत्र के प्रभाव से ही बनने लगते हैं, तब **स्वपोषित चालकता** का उदाहरण मिलता है।

निर्वात में (जैसे एलेक्ट्रोनी बल्बों में) धारा का कारण एलेक्ट्रोनों की गति है, जो निर्वात में रखे गये विद्युदों से उड़-उड़ कर निकलते रहते हैं। धातु में से मुक्त एलेक्ट्रोन को अलग करने के लिए नियत कार्य करना पड़ता है। इस कार्य को **निकासी कार्य** कहते हैं।

तापीय गति के प्रभाव-वश धातु में से एलेक्ट्रोन के **निकास को तापीय एलेक्ट्रोनी उत्सर्जन (या तापायनी उत्सर्जन)** कहते हैं, धातु में से एलेक्ट्रोन निकल जाये, इसके लिए आवश्यक है :

$$\frac{1}{2} m_e v_n^2 \geqslant A, \qquad (4.46)$$

जहां m_e = एलेक्ट्रोन का द्रव्यमान, v_n = एलेक्ट्रोन के तापीय वेग का सतह की अभिलंब दिशा में प्रक्षेप, A = निकासी कार्य।

तापायनी उत्सर्जन के महत्तम मान को (स्थिर तापक्रम पर) **संतृप्ति-धारा** कहते हैं। तापायनी उत्सर्जन में संतृप्ति-धारा का घनत्व निम्न सूत्र द्वारा निर्धारित होता है :

$$j = BT^2 e^{-A/(kT)} \qquad (4.47)$$

जहां B = स्थिरांक, T = परम तापक्रम, k = बोल्ट्समान का स्थिरांक (दे. पृ. 74), $e \approx 2.72$ — नैसर्गिक लघुगणकों का आधार। राशियां B व A को अक्सर **उत्सर्जन-स्थिरांकों** के नाम से पुकारा जाता है। सभी शुद्ध धातुओं के लिए राशि B का मान सिद्धांत की दृष्टि से समान होना चाहिए [60.2 $A/cm^2 \cdot K^2$)], पर प्रयोग में भिन्न मान प्राप्त होते हैं।

आक्साइड-कैथोडों का व्यापक उपयोग हो रहा है। ये धातु के बने आधार पर बेरियम (या कुछ अन्य विशेष धातुओं में से किसी एक) के आक्साइड का स्तर चढ़ा देने से प्राप्त होते हैं; इस प्रक्रिया से निकासी कार्य काफी कम हो जाता है।

गैस में स्थित ठंडे विद्युदों के बीच बड़ी तीव्रता (वोल्टता) वाला क्षेत्र प्रयुक्त करने पर निरावेशन चिनगारी के रूप में संपन्न होता है (तड़क)। तड़क के लिए आवश्यक वोल्टता (**तड़क-वोल्टता**) विद्युदों के पदार्थ, रूप व आकार (मापों) पर निर्भर करती है, उनकी आपसी दूरी और गैस की प्रकृति व उसके दाब पर भी।

यदि विद्युद चपटे व समानांतर हैं और उनके आकार उनकी आपसी दूरी के साथ तुलनीय हैं, तो दी हुई गैस व विद्युद-पदार्थों के लिए तड़क देने वाली वोल्टता सिर्फ गुणनफल pd पर निर्भर करती है (जहां p = गैस का दाब, d = विद्युदों की आपसी दूरी)। यदि p व d इस प्रकार बदलते हैं कि उनका गुणनफल स्थिर रहता है, तो तड़की वोल्टता भी स्थिर रहती है।

किसी विशेष वोल्टता पर तड़क देने वाली एलेक्ट्रोडों की आपसी दूरी को **स्फुलिंगाकाश** कहते हैं। स्फुलिंगाकाश के आधार पर विद्युतों के बीच वोल्टता का मान निर्धारित किया जा सकता है।

4. अर्धचालक

अर्धचालक ऐसे पदार्थों को कहते हैं, जिनमें विद्युचालकता एलेक्ट्रोनों की गति के कारण होती है और विशिष्ट प्रतिरोध कमरे के तापक्रम पर 10^{-2}—$10^{9}\Omega\cdot$cm के अंतराल में होता है। तापक्रम में परिवर्तन होने पर अर्धचालकों का विशिष्ट प्रतिरोध बहुत तेजी से बदलता है। धातुओं की तरह अर्धचालकों का प्रतिरोध तापक्रम ऊँचा होने पर बढ़ता नहीं, बल्कि घटता है। वह अर्धचालकों में उपस्थित अशुद्धियों पर भी बहुत निर्भर करता है।

परमाणु में स्थित एलेक्ट्रोन विविक्त (अलग-अलग) ऊर्जा-स्तरों (दे. पृ. 248) पर होते हैं; हर एलेक्ट्रोन ऊर्जा का एक निश्चित मान लिए होता है, जो दूसरे एलेक्ट्रोनों की ऊर्जा से भिन्न होता है। पृथक्कृत परमाणु में दो से अधिक एलेक्ट्रोन समान ऊर्जा-स्तर पर नहीं रह सकते; पर वे भी स्पिन की दिशा (दे. पृ. 249) के अनुसार एक-दूसरे से भिन्न होंगे।

किसी पदार्थ के पृथक्कृत परमाणुओं में परस्पर अनुरूप ऊर्जा-स्तर समान होंगे। व्यतिक्रिया (पारस्परिक क्रिया) के कारण हर परमाणु के ऊर्जा-स्तर थोड़ा-सा बदल जाया करते हैं (यदि उनकी तुलना पृथक्कृत परमाणुओं के ऊर्जा-स्तरों से की जाये)। व्यतिकारी परमाणुओं के ऊर्जा-स्तर परस्पर भिन्न होंगे।

चित्र 44. अर्धचालकों में ऊर्जा-स्तर।

उदाहरण के लिए चित्र 44a में पृथक्कृत (व्यतिक्रिया में भाग नहीं लेने वाले) परमाणुओं की ऊर्जा के K व L स्तर दिखाये गये हैं; n परमाणुओं

की व्यतिक्रिया की अवस्था में प्रत्येक स्तर n भिन्न स्तरों में "विघटित" हो जाता है (चित्र 44b)। "विघटित स्तरों" की ऊर्जा में करीब 10^{-22} — 10^{-23} eV का अंतर होता है। ऊर्जा के विघटित स्तर मिल-जुल कर ऊर्जा-स्तर की एक **अनुमत पट्टी** बनाते हैं। ये पट्टियां ऊर्जा के वर्जित मानों के अंतरालों द्वारा पृथक्कृत हैं। ऐसे अंतरालों को **वर्जित पट्टियों** का नाम दिया गया है। एलेक्ट्रोन ऐसा कोई ऊर्जा-स्तर नहीं रख सकता, जो वर्जित पट्टियों में आता है।

धातुओं के समान ही, अर्धचालकों की विद्युचालकता का कारण सिर्फ संयोजी एलेक्ट्रोन होते हैं, क्योंकि आंतरिक अभ्रों के एलेक्ट्रोन नाभिक के साथ मजबूती से जुड़े रहते हैं। 0 K पर संयोजी एलेक्ट्रोन निम्नतम ऊर्जा रखते हैं। इस पट्टी का कोई भी अनुमत स्तर खाली नहीं होता और इसे **पूरित** (या **संयुज्यता-**) **पट्टी** कहते हैं। 0 K पर अनुमत ऊर्जा-स्तरों की दूसरी पट्टी में एक भी एलेक्ट्रोन नहीं होता; इसे **चाल्यता-पट्टी** कहते हैं। पूरित पट्टी व चाल्यता-पट्टी एक-दूसरे से वर्जित पट्टी द्वारा पृथक होती हैं (चित्र 44b)। पूरित पट्टी से चाल्यता पट्टी में एलेक्ट्रोन के आने के लिए आवश्यक ऊर्जा की मात्रा ΔE_0 को **वर्जित पट्टी की चौड़ाई** कहते हैं। धातुओं में पूरित व चाल्यता-पट्टियां एक-दूसरी को अंशतः ढके होती हैं; पारविद्युकों में $\Delta E_0 > 2eV$।

विद्युचालकता का कारण चाल्यता पट्टी में एलेक्ट्रोनों की उपस्थिति है; यदि चाल्यता-पट्टी में एलेक्ट्रोन नहीं हैं, तो विद्युचालकता भी नहीं होगी।

तापीय-गति (अन्य कामों के अतिरिक्त) एलेक्ट्रोनों का चाल्यता-पट्टी में संक्रमण उपलब्ध कराती है। चाल्यता-पट्टी में एलेक्ट्रोनों की संख्या निम्न सूत्र द्वारा निर्धारित होती है :

$$n = Ae^{-\Delta E_0/2kT}, \qquad (4.48)$$

जहां A = स्थिरांक, k — बोल्ट्समान का स्थिरांक, T = परम तापक्रम।

विशिष्ट विद्युचालकता

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\Delta E_0/(kT)} \qquad (4.49)$$

चाल्यता-पट्टी में एलेक्ट्रोनों के संक्रमण के बाद संयुज्यता-पट्टी में रिक्त स्तर रह जाते हैं। बाह्य विद्युत-क्षेत्र की उपस्थिति में एलेक्ट्रोन दोनों ही पट्टियों में स्थानांतरित होते रहेंगे। चाल्यता-पट्टी में एलेक्ट्रोनों के स्थानांतरण से उत्पन्न चालकता **एलेक्ट्रोनी चालकता** या **n-रूपी चालकता** कहलाती है (n वर्ण शब्द negative से लिया गया है); संयुज्यता-पट्टी में एलेक्ट्रोनों के

स्थानांतरण से उत्पन्न चालकता **छिद्रिल चालकता** या **p-रूपी चालकता** कहलाती है (p शब्द positive का प्रथम वर्ण है)। पूरित पट्टी में एलेक्ट्रोन के स्थानांतरण को एलेक्ट्रोन की गति की विपरीत दिशा में धनावेश का स्थानांतरण माना जा सकता है। ऐसे धनावेश को औपचारिकतः **छिद्र** कहते हैं। समान संख्या में एलेक्ट्रोनों व छिद्रों (जो एलेक्ट्रोनों के संयुज्यता-पट्टी से चाल्यता-पट्टी में संक्रमण से बनते हैं) की गति से उत्पन्न चालकता को **निजी** (या **आंतरिक**) चालकता कहते हैं। निजी चालकता संयुज्यता-बंधों में विघ्न के कारण उत्पन्न होती है।

एलेक्ट्रोनी चालकता वाले अर्धचालक को **n-रूपी अर्धचालक** कहते हैं और छिद्रिल चालकता वाले को—**p-रूपी अर्धचालक**।

अर्धचालकों के व्यावहारिक उपयोग में **अशुद्धिजनित चालकता** को अधिकतम महत्त्व दिया जाता है; यह अर्धचालकों में उपस्थित अशुद्धियों के कारण उत्पन्न होती है। अशुद्धियां दो प्रकार की होती हैं—दाता और ग्राही। **दाता अशुद्धियां** ऊर्जा के अतिरिक्त अनुमत स्तरों को भी वर्जित पट्टी की ऊपरी सीमा के पास जन्म देती है। ऐसी अशुद्धियों के परमाणु एलेक्ट्रोनों को चाल्यता-पट्टी में पहुँचा देते हैं; अशुद्धिजनित एलेक्ट्रोनी चालकता इसी के कारण उत्पन्न होती है। **ग्राही अशुद्धियां** अतिरिक्त स्तरों को वर्जित पट्टी की निचली सीमा के पास जन्म देती हैं; इनके परमाणु एलेक्ट्रोनों को संयुज्यता-पट्टी से अपने स्तर पर ग्रहण कर लेते हैं, जिसके फलस्वरूप अशुद्धिजनित छिद्रिल चालकता उत्पन्न होती है।

जर्मेनियम में उपस्थित आवर्त प्रणाली के V-ग्रुप के तत्त्व (जैसे एंटीमनी) दाता अशुद्धियों के उदाहरण हैं और III-ग्रुप के तत्त्व (जैसे गैलियम) ग्राही अशुद्धियों के उदाहरण हैं। ऐसी अशुद्धिजनित चालकता भी संभव है, जब अर्धचालक में दाता और ग्राही, दोनों ही प्रकार की अशुद्धियां मिली रहती हैं। ध्यान देने योग्य बात है कि एलेक्ट्रोन और छिद्र, दोनों ही, हर प्रकार के अर्धचालक में हमेशा ही उपस्थित रहते हैं, पर उनकी असमान सांद्रता या चंचलता के कारण विद्युचालकता में उनका योगदान असमान रह सकता है।

5. ताप-विद्युत

यदि दो असमान चालकों में बने संवृत परिपथ में चालकों के संधि-स्थलों को भिन्न तापक्रमों पर रखा जाये, तो ऐसे परिपथ में धारा बहने लगेगी।

धारा का पोषण संधि-स्थलों पर उत्पन्न विवाब द्वारा होता है। इन परिस्थितियों में उत्पन्न विवाब को **तापीय विद्युवाहक बल (ता. विवाब)** कहते हैं और इस संवृति को **ताप-विद्युत** (या तापीय विद्युत) कहते हैं।

तापक्रम के कुछ अंतरालों में ता. विवाब तापक्रमों में अंतर का समानुपाती होता है। इस स्थिति में ता. विवाब $\mathscr{E}_1 = \alpha(T_1 - T_2)$ होता है। राशि α को **अंतराश्रयी ता. विवाब** (या **ता. विवाब का संगुणक**) कहते हैं; सांख्यिक रूप से यह तापक्रमों में 1 °C के अंतर से उत्पन्न ता. विवाब के बराबर होती है।

सारणी और ग्राफ

पार्थिव वातावरण में वैद्युत धारा

पार्थिव वैद्युत क्षेत्र (दे. सारणी 72) के प्रभाव से वातावरण में आयनों की धारा, अर्थात् चालकता-धारा उत्पन्न हो जाती है, जिसकी दिशा लंबवत नीचे की ओर होती है। इस धारा का घनत्व ऊँचाई के अनुसार नहीं बदलता, और "साफ" मौसम वाले क्षेत्र में $2-3 \times 10^{-16}$ A/cm² के बराबर होता है। विपरीत दिशा वाली धाराएं तड़ित-सक्रिय क्षेत्रों में उत्पन्न होती हैं।

जलमंडल (hydrosphere) में धारा का घनत्व 1 μA/cm² होता है।

वर्षा की बूंदों और आकाश से गिरने वाले ओले और बर्फ के फाहों पर उपस्थित आवेशों की गति से उत्पन्न धारा का घनत्व : शांत वर्षा में $10^{-11}-10^{-10}$ A/cm², ओले पड़ने व बिजली के साथ वर्षा होने पर 10^{-8} A/cm² तक।

तड़ित (आकाशी) विद्युत में धारा का बल 0.5 MA तक होता है, पर अधिकांश स्थितियों में 20 से 40 KA तक होता है।

तड़ित विद्युत की तीव्रता (वोल्टता) 10^9 V तक पहुँच जाती है। तड़ित का जीवन-काल करीब 1ms है, उसकी लंबाई लगभग 10 km होती है और उसके मार्ग की मुटाई 20 cm तक होती है।

वातावरण में एलोक्ट्रोनों की सांद्रता

चित्र 45. वातावरण में ऊंचाई के साथ-साथ एलेक्ट्रोनों की सांद्रता में परिवर्तन (कृत्रिम उपग्रहों व राकेटों से ली गयी नापों पर आधारित) डैश-रेखा अनुमित मान दिखाती है।

सारणी 78. धातुओं का विशिष्ट प्रतिरोध और प्रतिरोध का तापक्रमी गुणांक (20 °C पर)

धातु	ρ, 10^{-6} Ω·cm	α, 10^{-3} K^{-1}
अलमीनियम	2.8	4.9
कांसा (फास्फर-युक्त)	8.0	4.0
कामियम	2.7	—
चांदी	1.6	3.6
जस्ता	5.9	3.5
टिन	11.5	4.2
टंगस्टन	5.5	4.5
टैंटेलम	15.5	3.1
निकेल	10.0	5.0
तांबा	1.75	3.9
पारा	95.8	0.9
पीतल	2.5-6.0	2.7
मॉलिब्डेनम	5.7	3.3
लोहा	9.8	6.2
सीसा	22.1	4.1

टिप्पणी :—सारणी में राशियों के औसत मान दिये गये हैं। वास्तविक मान नमने की शुद्धता, उसके तापोपचार आदि पर निर्भर करते हैं।

शुद्ध धातुओं के प्रतिरोध का तापक्रमी गुणांक 1/273 K^{-1}=0.00367K^{-1} के करीब होता है।

सारणी 79. धातुओं और मिश्र धातुओं के अतिचालक की अवस्था में संक्रमण के लिये आवश्यक तापक्रम

द्रव्य	T, K	द्रव्य	T, K
अलमीनियम	1.2	टैंटलम	4.4
कैडमियम	0.6	नियोबियम	9.2
जस्ता	0.8	पारा	4.1
जिर्कोनियम	0.3	सीसा	7.3
टिन	3.7		
मिश्र धातु			
Bi-Pt	0.16	Sn-Hg	4.2
Pb-Au	2.0-7.3	Pb-Ag	5.8-7.3
Sn-Zn	3.7	Pb-Sb	6.6
Pb-Hg	4.1-7.3	Pb-Ca	7.0
यौगिक			
NiBi	4.2	Nb_2C	9.2
PbSe	5.0	NbC	10.1-10.5
$NbBi_2$	5.5	NbN	15-16
NbB	6	V_3Si	17.1
MoC	7.6-8.3	Nb_3Sn	18

टिप्पणी :—1. अतिचालक मिश्र धातु अधिक अवयवों वाले भी ज्ञात हैं : रोजे का मिश्र धातु (8.5 **K**), न्यूटन का धातु (8.5 K), वुड का धातु (8.2 K) Pb-As-Bi (9.0 K), Pb-As-Bi-Sb (9.0 K)

2. अतिचालकता की अवस्था में संक्रमण करने पर यौगिकों व मिश्र धातुओं का प्रतिरोध तापक्रम के पर्याप्त बड़े अंतरालों पर बदलता है (कभी-कभी 2K के अन्तराल पर)। संक्रमण का तापक्रम मिश्र धातुओं के तापोपचार पर भी निर्भर करता है। ऐसी परिस्थितियों के लिये सारणी में संक्रमण के तापक्रम में परिवर्तनों की सीमा दी गयी है।

सारणी 80. **उच्च सक्रिय प्रतिरोध वाले मिश्र धातु**
(20 °C पर)

मिश्र धातु (अवयवानुपात % में)	ρ, 10^{-4} Ω·cm	α, 10^{-3} K^{-1}	t, °C
कन्स्टैंटैन (58.8 Cu, 40 Ni, 1.2 Mn)	0.44-0.52	0.01	500
जर्मन सिल्वर (65 Cu, 20 Zn, 15 Ni)	0.28-0.35	0.04	150-200
निकेलाइन (54 Cu, 20 Zn, 26 Ni)	0.39-0.45	0.02	150-200
निक्रोम (67.5 Ni, 15 Cr, 16 Fe, 1.5 Mn)	1.0-1.1	0.2	1000
फेक्राल (80 Fe, 14 Cr, 6 Al)	1.1-1.3	0.1	900
मैंगेनीन (85 Cu, 12 Mn, 3 Ni)	0.42-0.48	0.03	100
रेयोंटैन (84 Cu, 12 Mn, 4 Zn)	0.45-0.52	0.4	150-200

टिप्पणी :—प्रतिरोध के तापक्रमी गुणांक का औसत मान α तापक्रम अन्तराल 0 से 100 °C तक के लिये सही है। सारणी के अंतिम स्तंभ में महत्तम अनुमत तापक्रम दिये गये हैं।

कन्स्टैंटेन के प्रतिरोध का तापक्रम-गुणांक −0.00004 से +0.00001 के अंतराल में बदल सकता है; यह नमूने पर निर्भर करता है। ऋण चिह्न से तात्पर्य है कि तापक्रम बढ़ने पर प्रतिरोध घटता है।

सारणी 81. **पृथक्कृत चालक में दीर्घकालीन कार्य के लिये अनुमत धारा-बल (ऐंपियर में)**

द्रव्य	अनुप्रस्थ काट का क्षेत्रफल							
	1	1.5	2.5	4	6	10	16	25
अलुमीनियम	8	11	16	20	24	34	60	80
तांबा	11	14	20	25	31	43	75	100
लोहा	—	—	8	10	12	17	30	—

सारणी 82. **फ्यूज वायर**

धारा-बल, A	5	15	30	60	100
टिन युक्त तांबे के तार का व्यास, mm	0.213	0.508	0.914	1.42	2.03

टिप्पणी :—फ्यूज वायर पर लिखा गया नामत (नोमिनल) धारा-बल महत्तम होता है, जिसे वह लंबे समय तक सहन कर सकता है। नामत मान से 1.8—2 गुना अधिक धारा-बल होने से फ्यूज वायर शीघ्र पिघल जाता है।

जलीय घोलों की विद्युचालकता

चित्र 46. चंद यौगिकों के जलीय घोलों की सांद्रता पर विद्युचालकता की निर्भरता (18 °C पर)। आयनों की मानक सांद्रता दिखायी गयी है। आयनों की मानक सांद्रता की इकाई ऐसा घोल है, जिसके इकाई आयतन में मोल के 1/n भाग आयन होते हैं (n = आयन की संयोजकता)।

सारणी 83. भिन्न सान्द्रता वाले विद्युविश्लेषकों की प्रतिरोधिता (18 °C पर)

घुल्य	c, %	ρ′, Mg/m³	ρ, Ω·cm	ϰ, K⁻¹
अमोनियम क्लोराइड	5	1.011	10.9	0.0198
	10	1.029	5.6	0.0186
	20	1.057	3.8	0.0161
गंधकाम्ल	5	1.032	4.8	0.0121
	20	1.14	1.5	0.0145
	30	1.22	1.4	0.0162
	40	1.30	1.5	0.0178
जिंक सल्फेट	5	1.062	52.4	0.0225
	10	1.107	31.2	0.0223
	20	1.232	21.3	0.0243
ताम्र सल्फेट	5	1.062	52.9	0.0216
	10	1.107	31.5	0.0218
	17.5	1.206	23.8	0.0236
नमकाम्ल	5	1.023	2.5	0.0158
	20	1.1	1.3	0.0154
	40	1.2	1.9	—
नाइट्रिक अम्ल	10	1.05	2.1	0.0145
	20	1.12	1.5	0.0137
	30	1.18	1.3	0.0139
	40	1.25	1.4	0.0150
सोडियम क्लोराइड	5	1.034	14.9	0.0217
	10	1.071	8.3	0.0214
	20	1.148	5.1	0.0716
सोडियम हाइड्रोक्साइड	5	1.05	5.1	0.0201
	10	1.11	3.2	0.0217
	20	1.22	3.0	0.0299
	40	1.43	8.3	0.0648

टिप्पणी : — विद्युविश्लेषकों की प्रतिरोधिता तापक्रम बढ़ने पर घटती है (इसमें वे धातुओं से भिन्न हैं)। अन्य तापक्रमों के लिये प्रतिरोधिता ρ_t निम्न सूत्र से ज्ञात हो सकती है [दे. समीकरण (4.28)] : $\rho_t = \rho_{18}[1 - \varkappa(t - 18)]$, जहां $\varkappa$ सारणी प्रदत्त तापक्रम गुणांक है, ρ_{18} 18 °C पर प्रतिरोधिता है और t वह तापक्रम है, जिसके लिये ρ_t ज्ञात की जा रही है (C सान्द्रता है, ρ' विद्युविश्लेषक का घनत्व है)।

सारणी 84. चंद धातु-युग्मों के तापीय विवाब (mV में)

संधि-स्थल का तापक्रम, °C	प्लैटिनम-10% रोडियम युक्त प्लैटिनम	लोहा-कंस्टैटेन	तांबा-कंस्टैटेन
−200	—	8	5.5
100	0.64	5	4
200	1.44	11	9
300	2.32	16	15
400	3.25	22	21
500	4.22	27	—
600	5.22	33	—
700	6.26	39	—
800	7.33	46	—
1000	9.57	58	—
1500	15.50	—	—

टिप्पणी : — दूसरे जोड़ (संधि-स्थल) का तापकम 0°C पर रखा गया है।

सारणी 85. प्लैटिनम के सापेक्ष अन्तराश्रयी तापीय विवाब α (0°C पर)

धातु या धातु-मिश्र	α, μV/K	धातु या धातु-मिश्र	α, μV/K
एंटीमनी	17.0	तांबा	7.4
कंस्टैटेन	−34.4	बिस्मथ	−65.0
जिंक एंटीमोनाइड	200	लेड टेलुराइड	−300
ताम्र (I) ऑक्साइड	1000	लोहा	16.0
निकेल	−16.4		

टिप्पणी : —ऋण-चिह्न दिखाते हैं कि धारा संधि-स्थल पर **α** के कम बीजगणितीय मान वाले धातु से बहती है। जैसे, तांबा-कंस्टैटेन युग्म में गर्म संधि-स्थल पर धारा कंस्टैटेन से तांबे की ओर बहती है।

ताम्र-कंस्टेंटेन युग्म का अंतराश्रयी तापीय विवाब

चित्र 47. तांबा-कस्टेंटेन युग्म के अंतराश्रयी तापीय विवाब की तापक्रम-निर्भरता ।

सारणी 86. विद्युरासायनिक तुल्यांक

आयन	μ/n, g/mol	k, mg/C	आयन	μ/n, g/mol	k, mg/C
H^+	1.008	0.0104	CO_3^{2-}	30.0	0.3108
O_2^{2-}	8.0	0.0829	Cu^{2+}	31.8	0.3297
Al^{3+}	9.0	0.0936	Zn^{2+}	32.7	0.3387
OH^-	17.0	0.1762	Cl^-	35.5	0.3672
Fe^{3+}	18.6	0.1930	SO_4^{2-}	48.0	0.4975
Ca^{2+}	20.1	0.2077	NO_3^-	62.0	0.642
Na^+	23.0	0.2388	Cu^+	63.6	0.6590
Fe^{2+}	27.8	0.2895	Ag^+	107.9	1.118

टिप्पणी :—प्रतीक पर स्थित ऋण या धन चिह्न की संख्या एक आयन द्वारा वहन किये जाने वाले प्राथमिक आवेशों की संख्या दिखाती है; μ=मोलीय द्रव्यमान, n=संयोजकता ।

सारणी 87. धातुओं के मानक विभव

धातु	V	धातु	V
कैडमियम	−0.40	निकेल	−0.23
कोमियम	0.56	पारा	0.86
चांदी	0.80	मैंगनीज	−1.05
जस्ता	−0.76	लोहा	−0.44
तांबा	−0.35	सीसा	−0.13

संचायकों का आवेशन व निरावेशन

चित्र 48. (*a*) मानक धारा $Q/4$, A द्वारा अम्लीय संचायक का आवेशन और तीन घंटे के कार्य वाली धारा ($Q/3$, A) द्वारा उसका निरावेशन करने पर उसके एक सेल के सिरों पर वोल्टता में होने वाले परिवर्तन (Q=संचायक की धारिता, C) । (*b*) अम्ल-निकेल (सतत रेखा) और कैडमियम-निकेल (डैश-रेखा) वाले संचायकों के आवेशन व निरावेशन में एक सेल के सिरों पर वोल्टता-परिवर्तन । आवेशन सामान्य कार्य-काल पर हो रहा है, $Q/6$, A (6 घंटे), निरावेशन—5 घंटे वाले कार्य-काल पर ($Q/5$, A) । लोहा-निकेल वाले संचायकों के लिये दिया गया वक्र आठ घंटे ($Q/8$, A) व तीन घंटे ($Q/3$, A) के कार्य-काल में निरावेशन के लिये है ।

सारणी 88. **गैल्वेनिक सेलों के विवाब**

सेल का नाम	ऋण ध्रुव	धन ध्रुव	घोल	विवाब, V
ग्रेने(ट) सेल	जस्ता	कार्बन	12 भाग $K_2Cr_2O_7$, 25 भाग H_2SO_4, 100 भाग H_2O	2.01
क्षारीय चांदी-जस्ता संचायक	जिंक आक्साइड	चांदी	पोटैशियम हाइड्रोक्साइड (KOH) का घोल	1.5
डेनियल सेल	जस्ता	तांबा	विद्युद अलग-अलग घोलों में हैं : जस्ता गंधकाम्ल के घोल में (5-10%) और तांबा कॉपर सल्फेट ($CuSO_4$) के संतृप्त घोल में	1.1
लेक्लांचे सेल	जस्ता	कार्बन	अमोनियम क्लोराइड का घोल, बुकनी कार्बन के साथ मैंगनीज पराक्साइड	1.46
लेक्लांचे सेल, सूखा	जस्ता	कार्बन	1 भाग ZnO, 1 भाग NH_4Cl, 3 भाग $ZnCl_2$ और इतना पानी कि लेई-सी बन जाये	1.3
क्षारीय लोहा-निकेल (या कैडमियम-निकेल) संचायक	लोहे की बुकनी (या लौह आक्साइड युक्त कैडमियम)	निकेल डाय-क्साइड	KOH का 20% सांद्रता वाला घोल	1.4-1.1
सीसा-अम्ल संचायक	झांवा सीसा	PbO_2	H_2SO_4 का 27-28% घोल, क्लोरीन से मुक्त, घनत्व 1.20	2.0-1.9 (15 °C पर)
वेस्टन का मानक सेल	कैडमियम का अमलगम	पारा	$CdSO_4$ का संतृप्त घोल, Hg_2SO_4 व $CdSO_4$ का पेस्ट	1.0183

सारणी 89. **जलीय घोलों में आयनों की चंचलता**

(18 °C पर)

धनायन	u_+, 10^{-4} cm²/(s·V)	ऋणायन	u_-, 10^{-4} cm²/(s·V)
H^+	32.63	OH^-	18.0
K^+	6.69	Cl^-	6.8
Na^+	4.5	NO_3^-	6.2
Ag^+	5.6	SO_4^{2-}	6.8
Zn^{2+}	4.8	CO_3^{2-}	6.2
Fe^{3+}	4.6		

टिप्पणी :—1. तापक्रम में 1 °C की वृद्धि होने पर आयनों की चंचलता में करीब 2% की वृद्धि होती है।

2. प्रतीक पर धन या ऋण चिह्नों की संख्या एक आयन द्वारा वहन किये जाने वाले प्राथमिक आवेशों की संख्या है।

सारणी 90. **धातुओं में एलेक्ट्रोनों की चंचलता**

[cm²/(s·V) में]

धातु	Ag	Na	Be	Cu	Au	Li	Al	Cd	Zn
चंचलता	56	48	44	35	30	19	10	7.9	5.8

टिप्पणी : — धातु के भीतर क्षेत्र की तीव्रता व्यवहारिकतः 1 mV/cm से अधिक नहीं होती, और इसीलिये एलेक्ट्रोनों के वेगों के सांख्यिक मान सारणी-प्रदत्त चंचलता के सांख्यिक मानों से काफी कम होंगे। यह निष्कर्ष सारणी 81 में प्रदत्त अनुमत धारा के मानों का समीकरण (4.24) में प्रयोग करके सरलतापूर्वक प्राप्त किया जा सकता है।

सारणी 91. गैसों में आयनों की चंचलता

(सामान्य दाब व 20°C तापक्रम पर, $cm^2/s \cdot V$ में)

गैस	धनायन	ऋणायन	गैस	धनायन	ऋणायन
ऑक्सीजन	1.3	1.8	हवा, जलवाष्प से संतृप्त	1.4	2.1
आर्गन	1.5	1.7			
कार्बन डायक्साइड	0.8	0.8	शुष्क हवा	1.4	1.9
नाइट्रोजन	2.7	—	हाइड्रोजन	6.3	8.1
पारा (दाब 133 Pa)	220	—	हीलियम	16.0	—

टिप्पणी :— 1. व्यापक स्थिति में चंचलता गैस में विद्युत-क्षेत्र की तीव्रता E और गैस के दाब p के अनुपात पर निर्भर करती है। यदि E/p का मान अधिक न हो, तो चंचलता स्थिर रहती है; जब आयनों के क्रमबद्ध वेगों के मान उनकी तापीय गति के वेगों के साथ तुलनीय होते हैं, तब चंचलता परिवर्तित होती है।

2. आयन के दिये हुए प्रकार की चंचलता गैस के घनत्व की व्युत्क्रमानुपाती होती है (दाब के अन्तराल 13 से 6×10^6 Pa में)। आयन के आवेश की मात्रा पर चंचलता बहुत कम निर्भर करती है।

3. चंचलता गैस की शुद्धता पर बहुत अधिक निर्भर करती है; इसीलिये सारणी में दी गयी चंचलता को काम-चलाऊ भर मानना चाहिये।

सारणी 92. आयनन में संपन्न कार्य

(आयनन का विभव)

आयनन	E_{ion}, eV	आयनन	E_{ion}, eV
$He \rightarrow He^+$	24.5	$H \rightarrow H^+$	13.5
$Ne \rightarrow Ne^+$	21.5	$O \rightarrow O^+$	13.5
$N_2 \rightarrow N_2^+$	15.8	$H_2O \rightarrow H_2O^+$	13.2
$Ar \rightarrow Ar^+$	15.7	$Xe \rightarrow Xe^+$	12.8
$H_2 \rightarrow H_2^+$	15.4	$O_2 \rightarrow O_2^+$	12.5
$N \rightarrow N^+$	14.5	$Hg \rightarrow Hg^+$	10.4
$CO_2 \rightarrow CO_2^+$	14.4	$Na \rightarrow Na^+$	5.1
$Kr \rightarrow Kr^+$	13.9	$K \rightarrow K^+$	4.3

सारणी 93. धातुओं व अर्धचालकों के उत्सर्जन-स्थिरांक

तत्व	A, eV	B, $A/(cm^2 \cdot K^2)$
अलुमीनियम	3.74	—
एंटीमनी	2.35	—
क्रोमियम	4.51	48
जर्मेनियम	4.56	—
टंगस्टन	4.50	60-100
टिन	4.31	—
टेलूरियम	4.12	—
तांबा	4.47	65
थोरियम	3.41	70
निकेल	4.84	30
प्लैटिनम	5.29	32
बेरियम	2.29	—
मोलिब्डेनम	4.37	115
यूरेनियम	3.74	—
लोहा	4.36	26
सीज़ियम	1.89	160
सिलिकन	4.10	—
सेलेनियम	4.72	—

टिप्पणी :— निकासी कार्य सतह की शुद्धता और अशुद्धियों पर बहुत अधिक निर्भर करता है। दिये गये मान शुद्ध नमूनों के लिये हैं।

सारणी 94. धातु पर झिल्लियों के उत्सर्जन-स्थिरांक

धातु	झिल्ली	A, eV	B, A/(cm²·K²)
टंगस्टन	जिर्कोनियम	3.14	5.0
"	थोरियम	2.58	1.5
"	बेरियम	1.56	1.5
"	यूरेनियम	2.81	3.2
"	सीजियम	1.36	3.2
टैंटेलम	थोरियम	2.52	0.5
मोलिब्डेनम	"	2.58	1.5

सारणी 95. ऑक्साइड-अस्तर वाले कैथोडों के उत्सर्जन-स्थिरांक

धनाग्र	A, eV	B, A/(cm²·K²)
बेरियम-ऑक्सीजन-टंगस्टन	1.34	0.18
बेरियम ऑक्सीकृत टंगस्टन पर	1.10	0.3
BaO, निकेल धातु-मिश्र पर	1.50-1.83	0.087-2.18
थोरियम ऑक्साइड के अस्तर वाला कैथोड (औसतमान)	2.59	4.35
निकेल-BaO-SrO	1.20	0.96
Pt-Ni, BaO-SrO	1.37	2.45

सारणी 96. अर्धचालकों के गुण

(t_g— गलनांक, ΔE_0—वर्जित पट्टी की चौड़ाई, u_n, u_p— क्रमशः एलेक्ट्रोनों व छिद्रों की चंचलताएं)

	t_g, °C	ΔE_0, eV	u_n, cm²/(V·s)	u_p, cm²/(V·s)
आयोडीन (I)	114	1.3	25	—
आर्सेनिक (भूरा) (As)	817	1.2	65	65
एंटीमनी (Sb)	630	0.13	—	—
जर्मेनियम (Ge)	958	0.75	3900	1900
टिन (α) (Sn)	232	0.08	2500	2400
टेलूरियम (Te)	450	0.32	1700	1200
फॉस्फोरस (काला) (P)	44	0.33	220	350
बोरोन (B)	2300	1.16	1	50
सेलेनियम (भूरा) (Se)	217	2.8	—	20
हीरा (C)	4030	5.4	1800	1400
सिलिकन (Si)	1414	1.15	1900	500
PbSe	1065	0.5	1400	1400
PbS	1114	1.2	650	800
AgBr	430	2.0	240	10^5 (1.7 K)
CdS	1750	2.5	350	15-50
Cu_2O	1232	1.5-2.2	100	100
α-Al_2O_3	2050	2.5	—	—
ZnO	1975	3.4	200	—

टिप्पणी :— चंचलता के प्रदत्त मान कमरे के तापक्रम पर चरम क्षेत्र से कम तीव्रताओं के लिये है।

विद्युत-क्षेत्र की तीव्रता पर चंचलता की निर्भरता के कारण अर्धचालकों में ओम के नियम का उल्लंघन प्रेक्षित हो सकता है। क्षेत्र की अल्पतम तीव्रता, जिस पर ओम के नियम का उल्लंघन दिखना शुरू हो जाता है, **चरम-क्षेत्र** (E_{cr}) कहलाती है। t=20 °C पर n-जर्मेनियम में चरम क्षेत्र—0.9 kV/cm, p-जर्मेनियम में—1.4 kV/cm, n-सिलिकन में—2.5 kV/cm, और p-सिलिकन में—7.5k V/cm होती है। तापक्रम घटाने से चरम क्षेत्र भी घटता है।

जर्मेनियम व सिलिकन का विशिष्ट प्रतिरोध

चित्र 49. अशुद्धि-परमाणुओं की सांद्रता पर जर्मेनियम (I) व सिलिकन (II) के विशिष्ट प्रतिरोध की निर्भरता। तापक्रम $\approx 20°C$।

चित्र 50. तापक्रम पर जर्मेनियम के विशिष्ट प्रतिरोध की निर्भरता। ऊर्ध्व अक्ष पर प्रतिरोध के मान लघुगणकी पैमाने पर लिये गये हैं और क्षैतिज अक्ष पर—परम तापक्रम की व्युत्क्रम राशि; N_{Ge}—जर्मेनियम-परमाणुओं की संख्या, N_{Sb}—एंटीमनी के परमाणुओं की संख्या।

चपटे विद्युदों के बीच तड़क-वोल्टता

चित्र 51. चपटे धातुई विद्युदों के लिये राशि pd पर तड़क-वोल्टता की निर्भरता (p=गैस का दाब, d=विद्युदों की आपसी दूरी)।

सारणी 97. **हवा में स्फुलिंगाकाश**
(सामान्य दाब पर, mm में)

क्षेत्र की तीव्रता (वोल्टता) kV	धातुई इलेक्ट्रोडों के रूप		
	दो बिंदु	5 cm व्यास वाले दो वर्तुल	दो पत्तर
20	15.5	5.8	6.1
40	45.5	13	13.7
100	200	45	36.7
200	410	262	75.3
300	600	530	114

C. चुंबकीय क्षेत्र, विद्युचुंबकीय प्रेरण

मूल अवधारणाएं और नियम

1. चुंबकीय प्रेरण. धाराओं की व्यतिक्रिया. चुंबकीय आघूर्ण

धारायुक्त चालकों, चुंबकों व धारायुक्त चालकों, चुंबकों के बीच व्यतिक्रिया (परस्पर या आपसी क्रिया) होती है। यह व्यतिक्रिया एक (भौतिक) क्षेत्र के माध्यम से होती है, जिसे **चुंबकीय क्षेत्र** कहते हैं। चुंबकीय क्षेत्र उन मापतंत्रों में प्रेक्षित होता है, जिनके सापेक्ष आवेशों की गति क्रमबद्ध (सुव्यवस्थित) होती है। जिन मापतंत्रों के सापेक्ष आवेश गतिहीन होते हैं, उनमें चुंबकीय क्षेत्र का कोई अस्तित्व नहीं होता।

चुंबकीय क्षेत्र की उपस्थिति का ज्ञान चुंबकीय सुई व धारायुक्त चालकों (या गतिमान आवेशों) पर उसके प्रभाव के कारण होता है ; इस प्रभाव को उत्पन्न करने वाले बल **चुंबकीय बल** कहलाते हैं। गतिहीन, स्थिर आवेशों पर चुंबकीय बल का कोई प्रभाव नहीं होता।

चुंबकीय क्षेत्र को लक्षित (कैरेक्टेराइज) करने के लिए सदिष्ट राशि **B** प्रयुक्त होती है, जिसे **चुंबकीय प्रेरण** कहते हैं। सदिश चुंबकीय प्रेरण की दिशा क्षेत्र के दिए हुए बिंदु पर स्थित चुंबकीय सुई के उत्तरी छोर पर

क्रियाशील बल की दिशा के साथ संपात करती है। चुंबकीय क्षेत्र में रखे हुए धारायुक्त चालक पर क्रियाशील बल ऐंपियर के नियम द्वारा निर्धारित होता है। (चित्र 52) :

$$\Delta \mathbf{F} = kI\,[\Delta \mathbf{l} \mathbf{B}],\quad |\Delta \mathbf{F}| = kI\Delta l B \sin\beta \qquad (4.50)$$

जहां I = धारा-बल, Δl = चालक की अत्यल्प (मौलिक या प्राथमिक) लंबाई (चालक की लंबाई का मूल), **B** = चुंबकीय प्रेरण, β = **B** व $\Delta \mathbf{l}$ के बीच

चित्र 52. धारायुक्त चालक-मूल पर क्रियाशील ऐंपियर-बल।

का कोण। चालक की मूल लंबाई $\Delta \mathbf{l}$ एक सदिश है, जिसकी दिशा धारा की दिशा के साथ संपात करती है। गुणनफल $I\Delta \mathbf{l}$ को **धारा-मूल** कहते हैं। समानुपातिकता का संगुणक k इकाइयों के चयन पर निर्भर करता है; यदि सभी राशियां एक ही प्रणाली में व्यक्त हैं, तो $k = 1$।

मापांक के अनुसार चुंबकीय प्रेरण उस बल के बराबर होता है, जिससे चुंबकीय क्षेत्र सदिश प्रेरण के अभिलंब स्थित इकाई धारा-मूल ($I\Delta l = 1$) पर क्रिया करता है। चुंबकीय प्रेरण माध्यम के गुणों पर निर्भर करता है।

अ. प्र. में प्रेरण की इकाई **टेसला** (T) है। 1 T ऐसे क्षेत्र का चुंबकीय प्रेरण है, जो सदिश प्रेरण के अभिलंब स्थित इकाई धारा-मूल 1 A·m पर 1 N बल लगाता है।

चुंबकीय प्रेरण **B** के साथ-साथ एक और राशि प्रयुक्त होती है—चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता **H**। निर्वात में **चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता** ऐसी राशि को कहते हैं, जो चुंबकीय प्रेरण **B** और चुंबकीय स्थिरांक μ_0 के अनुपात, अर्थात् $\mathbf{H} = \mathbf{B}/\mu_0$ के बराबर होती है। अ. प्र. में $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m $= 1.26 \cdot 10^{-6}$ H/m। किसी अन्य माध्यम में चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता $\mathbf{H} = \mathbf{B}/(\mu\mu_0)$ के बराबर होती है, जहां μ = माध्यम की सापेक्षिक **चुंबकीय वेधिता** है। गुणनफल $\mu\mu_0 = \mu_a$ को माध्यम की परम चुंबकीय **वेधिता** कहते हैं।

चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता की इकाई ऐंपियर प्रति मीटर (A/m) है। 1 A/m चुंबकीय क्षेत्र की ऐसी तीव्रता है, जो 4πA धारा वाले अनंत लंबे ऋजु चालक द्वारा उससे 2 m की दूरी पर उत्पन्न होती है।

चुंबकीय वेधिता μ वाले माध्यम में धाराओं की व्यतिक्रिया μ गुनी अधिक होगी, बनिस्बत कि निर्वात में उनकी व्यतिक्रिया के [दे. (4.51)]। **संपर्यक** (सब दिशाओं में समान गुण रखने वाले) **माध्यम** में सदिश **B** और **H** समान दिशाएं रखते हैं।

μ_0 की विमीयता और उसका सांख्यिक मान इकाइयों की प्रणाली के चयन पर निर्भर करते हैं (पृ. 287)। **सापेक्षिक चुंबकीय वेधिता** μ इकाइयों की प्रणाली के चयन पर निर्भर नहीं करती; इसके मान अक्सर निर्देशिका-तालिकाओं में दिये जाते हैं।

चित्र 53. बायें हाथ का नियम।

धारायुक्त चालक पर क्रियाशील बल की दिशा **बायें हाथ के नियम** द्वारा निर्धारित होती है : यदि चुंबकीय क्षेत्र की बल-रेखाएँ बायी हथेली पर लंबवत आपतन कर रही हैं और सिमटी उंगलियां धारा की दिशा दिखा रही हैं, तो दूर खिंचा हुआ अंगूठा चालक पर क्रियाशील बल की दिशा दिखाता है (चित्र 53)।

दो पर्याप्त लंबे, ऋजु, समानांतर व धारायुक्त चालक आपस में इस प्रकार व्यतिक्रिया करते हैं कि, यदि उनमें धारा की दिशाएं **समान होती हैं**, तो वे परस्पर आकर्षित होते हैं; धारा की दिशाएं विपरीत होने पर वे विकर्षित होते हैं। इस नियम की गणितीय अभिव्यंजना निम्न है :

$$F = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} l, \qquad (4.51)$$

जहां a = चालकों की आपसी दूरी, l = चालकों की लम्बाई, I_1, I_2 = चालकों में धारा-बल, μ = उस माध्यम की चुंबकीय वेधिता, जिसमें चालक स्थित हैं। (4.51) के आधार पर **धारा-बल की इकाई — ऐंपियर** — निर्धारित की जाती है। **ऐंपियर** *एक अपरिवर्तनशील धारा का बल है, जो निर्वात में परस्पर 1 m दूर स्थित नगण्य अनुप्रस्थ काट वाले दो अनंत लंबे, ऋजु व समानांतर चालकों में बह कर उनके 1 m लंबे भाग पर $2 \cdot 10^{-7}$ N के बराबर व्यतिक्रिया बल उत्पन्न करती है।*

चुंबकीय क्षेत्र में गतिमान आवेश (आविष्ट कण) पर एक बल क्रियाशील हो जाता है, जिसे **लौरेंस-बल** कहते हैं :

$$\mathbf{F}_L = Q[\mathbf{vB}], \text{ मापांक } F_L = QvB \sin\alpha, \qquad (4.52)$$

जहां Q = कण का आवेश, $\mathbf{v}$ = वेग, α = वेग व प्रेरण **B** के बीच का कोण। लौरेंस-बल की दिशा उस तल पर लंब होती है, जिसमें सदिश **v** व **B** स्थित होते हैं।

चुंबकीय क्षेत्र में रखी गयी समतली धारा-आकृति (फंदे) पर बलाघूर्ण **M** क्रिया करता है :

$$\mathbf{M} = IS[\mathbf{nB}], \; |\mathbf{M}| = ISB \sin\alpha, \qquad (4.53)$$

जहां I = धारा-बल, S = आकृति का क्षेत्रफल, **B** = चुंबकीय प्रेरण, α = आकृति के तल के लंब और सदिश **B** के बीच का कोण, **n** = आकृति पर लंबवत इकाई सदिश।

राशि $p_m = IS$ को **आकृति का चुंबकीय आघूर्ण** कहते हैं। चुंबकीय आघूर्ण एक सदिष्ट राशि है; इसकी दिशा दक्षिण पेंच के नियम से निर्धारित होती है : यदि पेंच को आकृति में बहती धारा की दिशा में घुमाया जाये, तो पेंच की अग्रवर्ती गति की दिशा p_m की दिशा के साथ संपात करेगी।

कई-एक आकृतियों का चुंबकीय आघूर्ण उनके चुंबकीय आघूर्णों के सदिष्ट योग के बराबर होता है।

Q आवेश वाला कण जब त्रिज्या R वाले वृत्तीय कक्ष पर रैखिक वेग v से घूमता है, तो उसका चुंबकीय आघूर्ण (मापांक में) निम्न सूत्र द्वारा निर्धारित होता है :

$$p_m = QvR/2. \qquad (4.54)$$

2. गतिशील आवेशों की व्यतिक्रिया

व्यतिक्रिया का कलन लौरेंस के रूपांतरकारी सूत्र के सहारे किया जाता है (दे. पृ. 9)। जब आवेश मापतंत्र के सापेक्ष अचल रहते हैं, तो इस तंत्र में उनकी व्यतिक्रिया का फल कूलंब के नियम के अनुसार कलित होता है (दे. पृ. 128)।

यदि एक आवेश, जैसे Q_1 (चित्र 54), अक्ष Ox के अनुतीर वेग v_1 से गतिमान है, और आवेश Q_2 अचल है, तो आवेश Q_2 पर क्रियाशील बल

चित्र 54. समान चिह्नों वाले गतिमान आवेशों की व्यतिक्रिया।

मान और दिशा में बदलता रहता है : बल का घटक F_x ज्यों-का-त्यों रहता है; घटक F_y बढ़ता है और उसका मान

$$F_y = \frac{Q_1Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \cdot \frac{\sin\alpha}{\sqrt{1-v_1^2/c^2}} \qquad (4.55)$$

होता है।

उस स्थिति में, जब दोनों ही आवेश अक्ष Ox के समानांतर गतिमान रहते हैं : Q_1—वेग v_1 से और Q_2—वेग v_2 से, आवेश Q_2 पर F_y के अलावे एक अतिरिक्त बल $\Delta F''_y$ क्रियाशील हो जाता है :

$$\Delta F''_y = -\frac{Q_1Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2_{12}} \cdot \frac{v_1v_2\sin\alpha}{c^2\sqrt{1-v_1^2/c^2}}\,\mathbf{j}_y, \qquad (4.56)$$

जहां $\mathbf{j}_y$ = अक्ष O_y के अनुतीर इकाई सदिश, $\mathbf{r}_{12}$ = Q_1 से Q_2 तक खींचा गया त्रिज्य सदिश, α = $\mathbf{r}_{12}$ व $\mathbf{v}_1$ के बीच का कोण। घटक F_x स्थिर रहता है। गतिमान आवेश Q_2 पर क्रियाशील बल $\mathbf{F}''_{12}$ की दिशा $\mathbf{r}_{12}$ दिशा के साथ संपात नहीं करती और इसी से यह बल कूलंब के बल से भिन्न है।

आवेश Q_2 के वैद्युत क्षेत्र में गतिमान आवेश Q_1 पर बल का एक अतिरिक्त घटक क्रियाशील होता है :

$$\Delta F_y' = -\frac{Q_1Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2_{21}} \cdot \frac{v_1v_2\sin\alpha}{c^2\sqrt{1-v^2_2/c^2}}\,\mathbf{j}_y. \qquad (4.57)$$

इस प्रकार, $|\Delta\mathbf{F}_y''| \neq |\Delta\mathbf{F}_y'|$, यदि $|\mathbf{v}_2| \neq |\mathbf{v}_1|$.

व्यापक स्थिति में गतिमान आवेश Q_1 के वैद्युत क्षेत्र में स्थित गतिमान आवेश Q_2 पर क्रियाशील बल $\mathbf{F}'_{12}$, और गतिमान आवेश Q_2 के विद्युत-क्षेत्र में स्थित गतिमान आवेश Q_1 पर क्रियाशील बल $\mathbf{F}'_{21}$ मापांक में समान नहीं होते; इनबलों की दिशाए आवेशों से गुजरने वाली सरल रेखा के साथ संपात नहीं करती।

अल्प वेगों ($v \ll c$) के लिए

$$\Delta\mathbf{F}_y = -\frac{Q_1Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \cdot \frac{v_1v_2\sin\alpha}{c^2}\,\mathbf{j}_y. \qquad (4.58)$$

इस बल को **चुंबकीय बल** कहते है। यदि जड़त्वी तंत्र किसी एक आवेश के साथ जुड़ा होगा, तो इस तंत्र में चुंबकीय क्षेत्र नहीं होगा; इस स्थिति में व्यतिक्रिया सिर्फ आवेशों के रैखिक घनत्व में परिवर्तन के कारण उत्पन्न विद्युत-क्षेत्र द्वारा निश्चित होती है। यदि धारायुक्त चालकों की व्यतिक्रिया के बारे में बात चल रही है, तो उनके बीच कूलंब द्वारा वर्णित व्यतिक्रिया शून्य होती है, क्योंकि विद्युत की दृष्टि से चालक उदासीन होते हैं (आवेशों का योग शून्य के बराबर होता है), और इसीलिए सिर्फ सूत्र (4.56) द्वारा निरूपित व्यतिक्रिया प्रेक्षित होती है।

3. निर्वात में चुंबकीय क्षेत्र

चुंबकीय क्षेत्र की **बल-रेखाएं** ऐसी रेखाओं को कहते हैं, जिनकी स्पर्श रेखाएं दिये हुए बिंदु पर क्षेत्र की तीव्रता की दिशा के साथ संपात करती हैं। क्षेत्र की चुंबकीय बल-रेखाएं संवृत होती हैं। (विद्युस्थैतिक क्षेत्र की बल रेखाएं इनसे इसी बात में भिन्न होती हैं)। ऋजुरैखिक धारा की बल-रेखाएं चालक के अभिलंब तल पर स्थित सहकेंद्रीय वृत्त होती हैं। (चित्र 55)। चुंबकीय क्षेत्र की बल-रेखा की दिशा **दक्षिण पेंच के नियम** से निर्धारित होती है : यदि पेंच को इस प्रकार घुमाया जाये कि, वह धारा की दिशा में आगे बढ़े, तो उसे घुमाने की दिशा बल-रेखाओं की दिशा बताती है (चित्र 55)।

चित्र 55. बियो-सावार्ट-लैप्लेस नियम का स्पष्टीकरण। दक्षिण पेंच का नियम।

धारा-मूल $\mathbf{I\Delta l}$ द्वारा उत्पन्न चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता :

$$\Delta\mathbf{H} = \frac{\mathbf{I}\,[\Delta\mathbf{l}\mathbf{r}_0]}{4\pi r^2},$$

$$|\Delta\mathbf{H}| = \frac{I\Delta l \sin\alpha}{4\pi r^2}, \qquad (4.59)$$

जहां $\mathbf{r}$=धारा-मूल से उस बिंदु तक खींचा गया त्रिज्य सदिश, जिस पर तीव्रता ज्ञात करनी है, $\alpha = \Delta\mathbf{l}$ व $\mathbf{r}$ के बीच का कोण, $\mathbf{r}_0$=इकाई सदिश। इस संबंध को **बियो-सावार्ट-लैप्लेस** का नियम कहते हैं।

धारायुक्त लंबे ऋजु चालक के विद्युत-क्षेत्र की तीव्रता

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{I}}{2\pi a}, \qquad (4.60)$$

जहां a=चालक से क्षेत्र के उस बिंदु तक की लांबिक दूरी, जिस पर तीव्रता ज्ञात करनी है।

वृत्ताकार धारा के केंद्र में चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता :

$$H_{\text{Vr}} = I/(2R), \qquad (4.61)$$

जहां R=वृत्त की त्रिज्या।

छल्लज (छल्ले पर तार लपेटने से बनी कुंडली, चित्र 56) के भीतर क्षेत्र की तीव्रता :

$$H_{\text{ch}} = NI/(2\pi r), \qquad (4.62)$$

जहां N=लपेटनों की कुल संख्या, r=छल्ले की औसत त्रिज्या।

यदि ऋजु **नलिज** (सीधी नली पर तार लपेटने से बनी कुंडली) की

चित्र 56. छल्लज।

लंबाई लपेटनों के व्यास की तुलना में अत्यधिक बड़ी है, तो ऐसे नलिज के भीतर (लपेटनों से दूर, नलिज के अक्ष पर) क्षेत्र की तीव्रता H_n सभी बिंदुओं पर समान होती है :

$$H_n = nI, \qquad (4.63)$$

जहां n=नलिज की इकाई लंबाई पर लपेटनों की संख्या। पर्याप्त लंबे नलिज में क्षेत्र समरूप होता है।

गतिमान आविष्ट कण (चित्र 57) के क्षेत्र की तीव्रता :

$$\mathbf{H}_Q = \frac{Q\,[\mathbf{v}\mathbf{r}_0]}{4\pi r^2}, \qquad (4.64)$$

और

$$\text{मापांक } \mathbf{H}_Q = \frac{Qv \sin\theta}{4\pi r^2},$$

जहां Q=कण का आवेश, $\mathbf{v}$=उसका वेग, $\mathbf{r}$=कण से उस बिंदु तक खींचा

चित्र 57. गतिमान कण का चुंबकीय क्षेत्र ।

गया त्रिज्य सदिश, जिस पर क्षेत्र को तीव्रता ज्ञात करनी है, θ=$\mathbf{v}$ व $\mathbf{r}$ के बीच का कोण, r_0=इकाई सदिश ।

4. चुंबकीय क्षेत्र में धारायुक्त चालक के स्थानांतरण से संपन्न कार्य. विद्युचुंबकीय प्रेरण

समरूप क्षेत्र में समतली आकृति से गुजरने वाला **चुंबकीय प्रवाह** चुंबकीय प्रेरण के मापांक B, आकृति के क्षेत्रफल S और आकृति के तल के अभिलंब के साथ क्षेत्र की दिशा द्वारा बने कोण α की कोज्या के गुणनफल को कहते हैं (चित्र 58) :

चित्र 58. चुंबकीय प्रवाह की परिभाषा।

$$\phi = \mathbf{Bn}S = BS \cos \alpha, \qquad (4.65)$$

जहां n = तल की लंब दिशा में इकाई सदिश ।

चुंबकीय प्रवाह की इकाई **वेबेर** (Wb) है । 1 Wb ऐसा चुंबकीय प्रवाह है, जो 1 T प्रेरण वाले समरूप चुंबकीय क्षेत्र के कारण अभिलंबी काट के 1 m^2 क्षेत्र से गुजरता है ।

चुंबकीय क्षेत्र में धारायुक्त चालक की गति के कारण संपन्न कार्य

$$A = I(\phi_2 - \phi_1), \qquad (4.66)$$

जहां ϕ_1=स्थानांतरण के आरंभ में धाराकृति से गुजरने वाला चुंबकीय प्रवाह, ϕ_2=स्थानांतरण के अंत में चुंबकीय प्रवाह ।

परिवर्तनशील चुंबकीय प्रवाह संवृत बल-रेखाओं वाला विद्युत-क्षेत्र (बवंडरी या **चक्रवातिक विद्युत-क्षेत्र**) उत्पन्न करता है । प्रेरित क्षेत्र चालक में परार बल (पृ. 143) की क्रिया के रूप में प्रकट होता है । इस संवृति को **विद्युचुंबकीय** (संक्षेप में—विच) **प्रेरण** कहते हैं और इससे उत्पन्न विद्युवाहक बल को **प्रेरण का विवाब** कहते हैं । प्रेरण के विवाब से उत्पन्न धारा **प्रेरित धारा** कहलाती है । प्रेरित धारा की दिशा ऐसी होती है कि, उसका चुंबकीय क्षेत्र प्रेरित धारा को उत्पन्न करने वाले चुंबकीय क्षेत्र को परिवर्तित होने से रोकता है **(लेंत्स का नियम)** ।

प्रेरण का विवाब निम्न सूत्र द्वारा ज्ञात किया जा सकता है :

$$\mathscr{E} = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t}. \qquad (4.67)$$

अर्थात्, मापांक के अनुसार प्रेरण का विवाब आकृति द्वारा घिरे क्षेत्र से गुजरने वाले चुंबकीय प्रवाह में परिवर्तन की दर के बराबर होता है । विवाब व $\Delta\phi/\Delta t$ के चिह्न विपरीत हैं (लेंत्स के नियमानुसार) ।

5. स्वप्रेरण

चालक में बहने वाली धारा में किसी भी प्रकार का परिवर्तन होने पर उसमें प्रेरण का विवाब उत्पन्न हो जाता है, जिसका कारण इस धारा का चुंबकीय प्रवाह होता है । संवृति को **स्वप्रेरण** कहते हैं ।

स्वप्रेरण का विवाब ज्ञात करने के लिए सूत्र है :

$$\mathscr{E} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}, \qquad (4.68)$$

जहां L = प्रेरिता, $\Delta I/\Delta t$ = धारा-बल में परिवर्तन की दर। L चालक के रूप व आकार पर तथा माध्यम के गुणों पर निर्भर करता है :

प्रेरिता एक भौतिक राशि है, जो इकाई दर से परिवर्तित होने वाली परिवर्ती धारा से उत्पन्न प्रेरण-विवाब के सांख्यिक मान के बरावर होती है।

अ. प्र. में प्रेरिता की इकाई **हेनरी** (H) है। 1 H ऐसे चालक की प्रेरिता है, जिसमें 1 s में 1 A धारा-परिवर्तन से 1 V के बरावर प्रेरण-विवाब उत्पन्न होता है।

क्रोड़युक्त (रीढ़युक्त) नलिज की प्रेरिता :

$$L=\frac{k\mu\mu_0 N^2 S}{l} \qquad (4.69)$$

जहां μ = चुंबकीय वेधिता, N = लपेटनों की संख्या, S = नलिज के अनुप्रस्थ काट का क्षेत्रफल, l = लंबाई, जिस पर तार लपेटा गया है, k = संगुणक, जो l/d पर निर्भर करता है (d लपेटन का व्यास है)। k के मान सारणी 107 में दिये गये हैं।

लंबाई l वाले समक्षीय केबिल की प्रेरिता :

$$L=\frac{l}{2\pi}\mu\mu_0 \ln\frac{R_2}{R_1}. \qquad (4.70)$$

जहां R_2 व R_1 वाह्य एवं आंतरिक बेलनों की त्रिज्याएं हैं।

बिजली की दुतारी लाइन (लंबाई $=l$, तारों के अनुप्रस्थ काट की त्रिज्या $=r$) की प्रेरिता :

$$L=\frac{l}{\pi}\mu\mu_0 \ln\frac{a}{r}, \qquad (4.71)$$

जहां a = तारों के अक्षों की आपसी दूरी ($r \ll a$ होने पर)।

चुंबकीय क्षेत्र द्वारा छेंके गये व्योम में ऊर्जा वितरित रहती है। धारा-बल I वाले चालक के गिर्द बने चुंबकीय क्षेत्र की ऊर्जा W निर्धारित करने के लिए सूत्र है

$$W=\frac{1}{2}LI^2. \qquad (4.72)$$

समरूप (सम-सर्वत्र) चुंबकीय क्षेत्र की ऊर्जा का घनत्व (इकाई व्योम में उपस्थित ऊर्जा का मान) निम्न सूत्र द्वारा ज्ञात होता है :

$$w=\frac{1}{2}\mu\mu_0 H^2, \qquad (4.73)$$

जहां H = चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता।

विद्युचुंबक का उत्थापक बल :

$$F=\frac{B^2 S}{2\mu_0}, \qquad (4.74)$$

जहां S = विद्युचुंबक के सिरे का अनुप्रस्थ काट, B = चुंबकीय प्रेरण।

भंवरी धारा या **फूको** (Foucault, फ्रांस के वैज्ञानिक) की धारा एक प्रेरित धारा है, जो परिवर्ती चुंबकीय क्षेत्र के कारण भारी-भरकम चालकों में उत्पन्न होती है।

6. द्रव में चुंबकीय क्षेत्र

चुंबकीय क्षेत्र में स्थित किसी भी पिंड में चुंबकीय आघूर्ण उत्पन्न हो जाता है। इस सवृति को **चुंबकन** कहते हैं। चुंबकित पिंड **चुंबिक** कहलाता है।

चुंबिक में चुंबकीय क्षेत्र दो घटकों से बना होता है : चालकों में प्रवाहमान स्थूल धाराओं के कारण उत्पन्न प्रेरण $\mathbf{B}_0=\mu_0\mu\mathbf{H}$ वाले क्षेत्र से और माध्यम में बहने वाली सूक्ष्म धाराओं के कारण उत्पन्न प्रेरण $\mathbf{B}_m$ वाले अतिरिक्त क्षेत्र से। प्रेरण $\mathbf{B}_m$ अंतराण्विक दूरियों पर काफी भिन्न मान रखता है, इसीलिए इस राशि का औसत मान $\langle\mathbf{B}_m\rangle$ निर्धारित करना पड़ता है। माध्यम में परिणामी चुंबकीय क्षेत्र का प्रेरण $\mathbf{B}=\mathbf{B}_0+\langle\mathbf{B}_m\rangle$ होता है।

द्रव्य के अणुओं में सवृत धाराएं परिसंचारित होती हैं; इस प्रकार की प्रत्येक धारा का अपना चुंबकीय का आघूर्ण होता है (दे. पृ. 175)। वाह्य चुंबकीय क्षेत्र की अनुपस्थिति में आण्विक धाराओं का अभिमुखन बेतरतीब होता है और उनके द्वारा उत्पन्न औसत क्षेत्र शून्य के बराबर होता है। चुंबकीय क्षेत्र के प्रभाव से अणुओं के चुंबकीय आघूर्ण मख्यतः क्षेत्र के अनुतीर अभिमुखित हो जाते हैं, जिसके कारण द्रव्य चुंबकित हो जाता है। द्रव्य के चुंबकन का स्तर चुंबकनता द्वारा निर्धारित होता है। चुंबकनता $\mathbf{J}$ (पहले इसे चुंबकन का सदिश कहते थे) द्रव्य के इकाई आयतन में स्थित अणुओं के सभी चुंबकीय आघूर्णों $\mathbf{p}_m$ के सदिष्ट योग के बराबर होती है :

$$\mathbf{J} = (\Sigma \mathbf{p}_m)/V. \quad (4.75)$$

चुंबकनता चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता-सदिश की समानुपाती होती है :

$$\mathbf{J} = \varkappa \mathbf{H} \quad (4.76)$$

राशि $\varkappa$ को **चुंबकीय प्रवणता** कहते हैं; यह एक विमाहीन राशि है। **B**, **H**, **J** और μ व $\varkappa$ के बीच निम्न संबंध है :

$$\langle \mathbf{B}_m \rangle = \mu_0 \mathbf{J}, \ \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{J}, \ \mu = 1 + \varkappa. \quad (4.77)$$

किसी द्रव्य की **विशिष्ट प्रवणता** $\varkappa_\rho$, उस द्रव्य की ग्राह्यता (प्रवणता) $\varkappa$ व उसके घनत्व ρ से अनुपात के बराबर होती है, अर्थात् $\varkappa_\rho = \varkappa/\rho$.

H पर B (या J) की निर्भरता निर्धारित करने वाले वक्र को **चुंबकन का वक्र** कहते हैं।

जिन द्रव्यों के लिए $\varkappa$ शून्य से थोड़ा सा अधिक होता है, उन्हे **पराचुंबकीय पदार्थ (पराचुंबिक)** कहते है; जिन द्रव्यों के लिए $\varkappa < 0$, वे **पारचुंबकीय पदार्थ (पारचुंबिक)** कहलाते है। जिन द्रव्यों के लिए $\varkappa$ इकाई से बहुत अधिक होता है, उन्हे **लौहचुंबिक** का नाम दिया गया है।

लौहचुंबिक पराचुंबिक व पारचुंबिक से कई गुणों में भिन्न होते हैं।

चित्र 59. चिरावन-पाश: 01-अचुंबकित अवस्था से चुंबकन का वक्र, 123-अचुंबकन का वक्र।

(a) लौहचुंबिकों का चुंबकन-वक्र जटिल प्रकृति का होता है (चित्र 59); पारचुंबिकों के लिए वह धनात्मक कोणिक संगुणक वाली सरल रेखा जैसा

होता है और पारचुंबिकों के लिए ऋणात्मक कोणिक संगुणक वाली सरल रेखा जैसा।

लौहचुंबिकों की चुंबकीय ग्राह्यता और वेधिता क्षेत्र की तीव्रता **पर निर्भर** करती हैं; **पराचुंबिकों व पारचुंबिकों** में ऐसी निर्भरता नहीं होती।

लौहचुंबिकों के लिए अक्सर आरंभिक चुंबकीय वेधिता (μ_a) निर्दिष्ट की जाती है; यह चुंबकीय वेधिता का सीमांत मूल्य है, जब क्षेत्र की तीव्रता और उसका प्रेरण शून्य के निकट होता है, अर्थात

$$\mu_a = \lim_{H \to 0} \mu.$$

लौहचुंबिकों के लिए H पर μ की निर्भरता का वक्र अपने उच्चीष्ठ से गुजरता है (दे. चित्र 61a)। अक्सर महत्तम मान μ_{max} भी दिखाया जाता है (दे. सा 98 व 99)।

(b) लौहचुंबिकों की चुंबकीय ग्राह्यता तापक्रम के साथ-साथ बढ़ती है। एक नियत तापक्रम T_C पर लौहचुंबिक पराचुंबिक में परिणत हो जाता है; इस तापक्रम को **क्यूरी-तापक्रम** या **क्यूरी-बिंदु** कहते है। क्यूरी-बिंदु से ऊँचे तापक्रमों पर द्रव्य पराचुंबिक होता है। क्यूरी-तापक्रम के पास लौहचुंबिक की चुंबकीय ग्राह्यता तेजी से बढ़ जाती है।

पारचुंबिकों और कुछ पराचुंबिकों (जैसे क्षारीय धातुओं) में चुंबकीय ग्राह्यता तापक्रम पर निर्भर नहीं करती। पराचुंबिकों की चुंबकीय ग्राह्यता (कुछेक अपवादों को छोड़ कर) परम तापक्रम के व्युत्क्रम अनुपात में परिवर्तित होती है।

(c) निचुंबकित लौहचुंबिक बाह्य चुंबकीय क्षेत्र द्वारा चुंबकित हो जाता है; H पर B (या J) की निर्भरता वक्र 0-1 द्वारा निरूपित है (दे. चित्र 59)। इसे **चुंबकन का आरंभिक वक्र** कहते है। क्षीण क्षेत्र में चुंबकन तेजी के साथ बढ़ता है, फिर धीमा हो जाता है और अंत में संतृप्ति की अवस्था आ जाती है और क्षेत्र (की शक्ति) में और वृद्धि करने पर भी चुंबकन व्यावहारिकत: स्थिर रहता है।

चुंबकनता J का महत्तम मान संतृप्ति-चुंबकनता (J_s) कहलाता है। H को शून्य तक कम करने पर B (या J) वक्र 1-2 के अनुसार बदलता है : प्रेरण में परिवर्तन क्षेत्र की तीव्रता में होने वाले परिवर्तन से पीछे छूटने लगता है; इस संवृति को **चुंबकीय चिरावन** (magnetic hysteresis[1]) कहते हैं।

1. यूनानी **husteresis** (=देर से आना) शब्द से। —अनु.

क्षेत्र हटा लेने पर (जब $H=0$) बचा हुआ चुंबकीय प्रेरण **अवशिष्ट चुंबकीय प्रेरण** (B_r) कहलाता है। चित्र 59 में यह खंड 0-2 के बराबर है। लौहचुंबिक को निचुंबकित करने के लिए अवशिष्ट प्रेरण को दूर करना पड़ता है। इसके लिए आवश्यक है कि विपरीत दिशा वाला क्षेत्र उत्पन्न किया जाये। विपरीत दिशा वाले क्षेत्र में चुंबकीय प्रेरण का परिवर्तन-वक्र 2-3-4 द्वारा निरूपित होगा। क्षेत्र की तीव्रता H_c (चित्र 59 में खंड 0-3), जिस पर चुंबकीय प्रेरण शून्य के बराबर हो जाता है, **निग्रही तीव्रता** (या बल) कहलाती है।

$+H$ से $-H$ के अंतराल में चुंबकीय क्षेत्र की आवर्त रूप से परिवर्तनशील तीव्रता पर B (या J) की निर्भरता वक्र 1-2-3-4-5-6-1 द्वारा निरूपित होती है। ऐसे निर्भरता-वक्र को **चिरावन-पाश** कहते हैं।

क्षेत्र की तीव्रता में $+$ से $-H$ तक के परिवर्तन के एक चक्र में खर्च हुई ऊर्जा चिरावन-पाश के क्षेत्रफल की समानुपाती होती है।

लौहचुंबिकों के गुणों का कारण उनमें ऐसे 'इलाकों' की उपस्थिति है, जो वाह्य चुंबकीय क्षेत्र के बिना ही स्वतःस्फूर्त रूप से संतृप्ति की अवस्था तक चुंबकित होते हैं; ऐसे 'इलाकों' को **प्रांत** कहते हैं। प्रांतों की स्थिति और चुंबकनता ऐसी होती हैं कि क्षेत्र की अनुपस्थिति में कुल जोड़ी गयी चुंबकनता शून्य के बराबर होती है। जब लौहचुंबिकों को चुंबकीय क्षेत्र में रखा जाता है, तब प्रांतों के बीच की सीमा-रेखाएं स्थानांतरित हो जाती हैं (क्षीण क्षेत्रों में), प्रांतों की चुंबकनता के सदिश चुंबक्कारी क्षेत्र की दिशा में घूम जाते हैं (प्रबल क्षेत्रों में) और फलस्वरूप लौहचुंबिक चुंबकित हो जाते हैं।

चुंबकीय क्षेत्र में रखे गये लौहचुंबिक के रैखिक नापों में परिवर्तन होता है, अर्थात् उसकी रूप-विकृति होती है। इस संवृत्ति को **चुंबकीय अपरूपण** कहते हैं। लंबाई में सापेक्षिक वृद्धि लौहचुंबिक की प्रकृति और चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता पर निर्भर करती है। चुंबकीय विरूपण-प्रभाव की मात्रा क्षेत्र की दिशा पर निर्भर नहीं करती; कुछ द्रव्यों में क्षेत्र के अनुतीर लंबाइयों में कमी हो जाती है (जैसे निकेल में) और कुछ में वृद्धि (जैसे क्षीण क्षेत्रों के कारण लोहे में)। इस संवृत्ति का उपयोग 100 kHz तक की आवृत्ति वाले पराश्रव्यिक दोलन प्राप्त करने में होता है।

सारणी और ग्राफ

पृथ्वी का चुंबकीय क्षेत्र

पृथ्वी चुंबकीय क्षेत्र से आवृत है।

पृथ्वी के जिन बिंदुओं पर चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता की दिशा उदग्र होती है, उन्हें **चुंबकीय ध्रुव** कहते हैं। ऐसे बिंदु पृथ्वी पर दो हैं: उत्तरी चुंबकीय ध्रुव (यहां बल-रेखाओं की दिशाएं नीचे की ओर हैं) और दक्षिणी चुंबकीय ध्रुव (यहां बल-रेखाओं की दिशाएं ऊपर की ओर हैं।) पृथ्वी के चुंबकीय व भौगोलिक ध्रुव संपात नहीं करते; उत्तरी चुंबकीय ध्रुव दक्षिणी गोलार्ध में है, और दक्षिणी चुंबकीय ध्रुव—उत्तरी गोलार्ध में। चुंबकीय ध्रुवों की स्थिति कालांतर में बदलती रहती है।

चुंबकीय ध्रुवों से गुजरने वाली सरल रेखा को पृथ्वी का **चुंबकीय अक्ष** कहते हैं। चुंबकीय अक्ष के अभिलंब तल पर स्थित बड़े वृत्त की परिधि **चुंबकीय विष्वक** कहलाती है। चुंबकीय विष्वक के बिंदुओं पर चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता की दिशाएं क्षैतिज होती हैं। चुंबकीय अक्ष पृथ्वी के अहर्निश घूर्णन के अक्ष के साथ संपात नहीं करता।

चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता चुंबकीय विष्वक पर करीब 27.1 A/m होती है, और चुंबकीय ध्रुवों पर—करीब 52.5 A/m। कुछ स्थलों पर तीव्रता बहुत अधिक होती है; इन स्थलों को चुंबकीय असंगति कहते हैं। चुंबकीय असंगति के कुर्स्कायार अंचल (रूसी रिपब्लिक में उक्रैन की सीमा के पास) में तीव्रता ~160 A/m तक है।

चित्र 60. अधिक ऊँचाइयों पर पार्थिव चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता।

सारणी 98. **विद्युतकनीक में प्रयुक्त इस्पातों के गुण**

इस्पात का मार्का	μ_{in}	μ_{max}	H_{c}, A/m	B (2kA/cm पर) T	ρ, 10^{-4} Ω·cm
Э 31	250	5500	43.8	1.46	0.5
Э 41	300	6000	35.8	1.46	0.6
Э 42	400	7500	31.8	1.45	0.6
Э 45	600	10000	19.9	1.46	0.6
Э 310	1000	30000	9.6	1.75	0.5

सारणी 99. **लोहा-निकेल धातुमिश्र के गुण**

धातु मिश्र	μ_{in}	μ_{max}	H_{c}, A/m	M_{s}, MA/m	ρ, 10^{-4}Ω·cm
79HM	20000	100000	2.4	0.64	0.55
80HXC	35000	120000	1.2	0.56	0.62
50HCX	3000	30000	15.9	0.80	0.85
50H	3000	35000	9.55	1.19	0.45
65HII	3000	100000	7.96	1.04	0.35
50HII	2000	20000	15.9	1.19	0.45
Mo-पेर्मएलोय	20000	75000	2.4	0.67	0.55
78.5 Ni-पेर्मएलोय	10000	100000	2.0	0.85	0.16

टिप्पणी :—1. इन मिश्र-धातुओं की चुंबकीय वेधिता बहुत ऊंची होती है और वह अधिक तीव्रता वाले क्षेत्र में व उच्च आवृत्ति के प्रभाव से तेजी के साथ कम होने लगती है। इसके अतिरिक्त वह यांत्रिक प्रतिबल पर भी बहुत निर्भर करती है।

2. प्रतीक देखें पृ. 184-186 पर।

सारणी 100. **ठोस चुंबिक द्रव्यों के गुण**

द्रव्य	H_{c}, kA/m	B_{r}, T	$HB/2$, kJ/m^3
इस्पात : EX3	4.8	0.95	1.2
EB6	4.9	1.00	1.3
BX5K5	7.9	0.85	1.8
EX9K15M2	13.5	0.80	2.8
प्लैटिनम-चुंबकीय मिश्रधातु	119-318	0.3-0.6	1-1.5
बेरियम फेराइट	127-231	0.18-0.4	3-15
Alni 1 (AH 1)	19.9	0.7	2.8
Alni 3 (AH 3)	39.8	0.5	3.6
Alnico 12 (AHKO 1)	39.8	0.68	5.5
Alnico 18 (AHKO 3)	51.7	0.9	9.7
Alnisi (AHK)	59.7	0.4	4.3
Magnico (AHKO 4)	39.8	1.23	15.0

टिप्पणी :—इन द्रव्यों का निग्रही बल बहुत अधिक होता है और ये स्थायी चुंबक बनाने के काम आते हैं। इनका एक महत्वपूर्ण लक्षण है—राशि $HB/2$ का अत्यधिक उच्च मान। यह राशि लौहचुंबिकों को आवृत रखने वाले चुंबकीय क्षेत्र की अधिकतम ऊर्जा के साथ समानुपाती होती है।

सारणी 101. **चुंबकीय पारविद्युकों के गुण**

द्रव्य	μ	α, 10^{-6} K^{-1}
प्रेस पेर्म T4-180	160-200	+400
आल-सीफर T4-90	75-85	+400
आल-सीफर T4-60	55-65	−300, −400
आल-सीफर B4-32	30-34	−200, +250
लौह कार्बोनिल	11-14	−50, +50
फेरो-एलास्ट	9-10	−50, +50
आल सीफर P4-6	5-8	−80, −150

टिप्पणी :—चुंबकीय पारविद्युक लौहचुंबिकों के सूक्ष्म कणों (10^{-1}-10^{-4}cm) से बनते हैं, जो पारविद्युक द्वारा परस्पर संबद्ध रहते हैं। इन द्रव्यों का विशिष्ट प्रतिरोध 1 से 400 Ω·cm के परास में होता है; α प्रतिरोध का तापक्रमी गुणांक है।

सारणी 102. फेराइटों के मुख्य गुण

फेराइट	μ_{in}	α, $10^{-6}K^{-1}$	ρ, Ω cm
निकेल-जिंक व लीथियम-जिंक फेराइट			
2000HH	2000	6	10^4-10^7
600HH	600	6	
400HH	400	5	
200HH	200	4-25	
100HH	100	10-30	
50BЧ	50	50	
मैंगनीज-जिंक फेराइट			
4000HM	4000	2	
3000HM	3000	3	10^2
2000HM	2000	0.6-1.5	
1500HM	1500	0.6-1.5	
1000HM	1000	1.5	

टिप्पणी :—फेराइट धातुओं (निकेल, जस्ता, लोहा) के आक्साइडों का मिश्रण है, जिनका विशिष्ट प्रतिरोध विशेष तापीय उपचार द्वारा बढ़ा दिया जाता है। α प्रतिरोध का तापक्रमी गुणांक है।

सारणी 103. पराचुंबिकों व पारचुंबिकों की चुंबकीय वेधिता

पराचुंबिक	$(\mu-1)$, 10^{-6}	पारचुंबिक	$(1-\mu)$, 10^{-6}
नाइट्रोजन	0.013	हाइड्रोजन	0.063
हवा	0.38	बेंजीन	7.5
आक्सीजन	1.9	पानी	9.0
एबोनाइट	14	तांबा	10.3
अलुमीनियम	23	कांच	12.6
टंगस्टन	176	साधारण नमक (खनिज)	12.6
प्लैटिनम	360	क्वार्ट्स	15.1
द्रव आक्सीजन	3400	बिस्मथ	176

सारणी 104. धातुओं का क्यूरी तापक्रम

द्रव्य	t_C, °C	द्रव्य	t_C, °C
गैडोलीनियम	20	मैग्नेटाइट	585
वेध्य मिश्रधातु (पर्म=एलोय), 30%	70	लोहा (विद्युत् विश्लेषण से)	769
होइस्लर मिश्रधातु	200	लोहा, हाइड्रोजन में पुनर्दाहित	774
निकेल	358	कोबाल्ट	1140
वेध्य मिश्रधातु 78%	550		

सारणी 105. धातुओं तथा अर्धचालकों की चुंबकीय प्रवणता (18-20° सें० पर)

द्रव्य	χ_ρ, 10^{-6} cm^3/g	द्रव्य	χ_ρ, 10^{-6} cm^3/g
अलुमीनियम (ब)	0.58	टिन β (ब)	0.03
इंडियम (ब)	—0.11	टेलूरियम (ब)	—2.9
एंटीमनी (ब)	—0.80	तांबा (ब)	—0.86
कैडमियम (ब)	—0.18	पारा (द्र)	—0.17
कैल्शियम (ब)	1.1	मैंगेनीज (β, α)	8.8-9.6
क्रोमियम (ब)	3.6	लीथियम	3.6
चाँदी (ब)	—0.19	वैनेडियम (ब)	1.4
जर्मेनियम	—0.12	सीसा (ब)	—0.12
जस्ता (ब)	—0.14	सेलेनियम (अ)	—0.31
टंगस्टन (ब)	0.28	सोडियम	0.61

टिप्पणी--कोष्ठकों में दिये गये प्रतीक : ब—बहुक्रिस्टलीय, द्र—द्रव, अ—अक्रिस्टलीय, α व β—तदनुरूप रूपांतरण।

लौहचुंबिकों की चुंबकीय वेधिता, प्रेरण, विरावन और विरूपण

(चित्र 61, 62, 63.)

(a)

(b)

चित्र 61. (a) क्षीण क्षेत्रों में लोहे और पेर्म-एलोय की चुंबकीय वेधिता का तीव्रता के साथ संबंध (b) इस्पात और ढलवें लोहे के चुंबकीय प्रेरण की क्षेत्र-तीव्रता पर निर्भरता। (आर्मको लोहा American Rolling Mill Corporation द्वारा प्राप्त लोहा है, जिसमें 1% से भी कम अशुद्धियां होती हैं; पेर्म-एलोय वेधिता रखने वाले मिश्रधातुओं को कहते हैं।—अनु.)

सारणी 106. लौहचुंबिक और फेराइट में प्रेरण व विरावन-हानि

द्रव्य	प्रेरण B (T); H(A/m) के लिये						हानि J/m^3
	8	40	160	800	4000	40000	
इस्पात, चदरा	0.004	0.04	0.9	1.45	1.65	2.1	250
„ नर्म (0.1% C)	0.003	0.03	0.6	1.4	1.7	2.1	500
ढलवां लोहा, तापानुशीतित	—	—	0.06	0.5	0.85	1.4	1000
फेराइट : Mn-Zn	0.008	0.05	0.23	0.36	—	—	—
Ni-Zn	0.0005	0.008	0.01	0.15	0.24	—	—
Mg-Mn	—	0.01	0.2	0.23	—	—	—
30% Ni-Fe	—	—	—	0.25	0.31	—	—
70% Ni-Cu	—	—	—	0.06	0.1	—	—
लोहा (35% Co)	—	—	0.4	1.5	2.1	2.4	350
„ चदरा (4.3% Si)	0.02	0.45	1.0	1.35	1.53	1.95	69
„ तापानुशीतित	0.01	0.075	1.4	1.6	1.72	2.1	60
„ विद्युविश्लेषण से प्राप्त	0.004	0.05	1.1	1.5	1.7	2.1	250

टिप्पणी :—1. सारणिक मान निकटवर्ती हैं, क्योंकि वे नमूने-विशेष पर निर्भर करते हैं।

2. अंतिम स्तंभ 1 पुनर्चुंबकन-चक्र के लिये 1 m^3 द्रव्य में हानि दिखाता है (उस स्थिति में, जब विरावन-पाश में प्रेरण का महत्तम मान 0.1T है)।

चित्र 62. नर्म लोहे और कठोरकृत इस्पात ($\simeq 1\%$ C युक्त) के लिये चिरावन-पाश।

सारणी *107*. प्रेरिता का कलन करने के लिए गुणांक k के मान

लपेटन की लंबाई और उसके व्यास का अनुपात (l/d)	0.1	0.5	1	5	10
k	0.2	0.5	0.6	0.9	~ 1.0

टिप्पणी : $-l/d \geqslant 10$ के लिए $k \simeq 1$ ।

चित्र 63. चुंबकीय विरूपण में अनुतीर्य विकृति : 1—54% Pt, 46% Fe; 2—70% Co, 30% Fe; 3—50% Co, 50% Fe; 4—50% Ni, 50% Fe; 5—लोहा; 6—जालित कोबाल्ट; 7—फेराइट 20% Ni, 80% Zn; 8—निकेल। दुर्लभ पार्थिव धातुओं (विरल मृदाओं) व युरेनियम-यौगिकों के लिये $\Delta l/l_0$ करीब 2-3 क्रम अधिक होता है।

D. वैद्युत दोलन और विद्युचुंबकीय तरंग

मूल अवधारणाएं और नियम

1. परिवर्ती धारा

मान या दिशा (या दोनों ही) में कालांतर से बदलते रहने वाली धारा को **परिवर्ती धारा** कहते हैं। सिर्फ मान के अनुसार बदलने वाली धारा को **स्पंदी धारा** कहते हैं। अधिकतर स्थितियों में ज्यावत परिवर्ती धारा प्रयुक्त होती है (चित्र 64)। आवर्ती अज्यावत धारा को ज्यावत परिवर्ती धाराओं के योगफल के रूप में किसी भी कोटि की परिशुद्धता से व्यक्त कर सकते है (दे. पृ. 105)।

समय के किसी दिये गये क्षण में परिवर्ती धारा के बल का सांख्यिक मान

चित्र 64. परिवर्ती वोल्टता व धारा में ज्यावत परिवर्तन ($\varphi=0$)।

उसका **क्षणिक मान** कहलाता है, जो संबंध (4.21) द्वारा निर्धारित होता है। ज्यावत परिवर्ती धारा का क्षणिक मान और उसकी तीव्रता (वोल्टता) निम्न सूत्रों से व्यक्त होते हैं :

$$i=I_0 \sin \omega t, \tag{4.78}$$

$$u=U_0 \sin (\omega t+\varphi), \tag{4.79}$$

जहां I_0 व U_0 क्रमशः धारा और वोल्टता के महत्तम (आयामी) मान हैं, ω=धारा की चक्रीय आवृत्ति, t=समय, φ=धारा व वोल्टता के बीच का प्रावस्था-अंतर (दे. पृ. 104), $\omega=2\pi f$, f=धारा की आवृत्ति।

परिवर्ती धारा के बल का कारगर मान ऐसे स्थिर धारा-बल का मान है, जो उसी सक्रिय प्रतिरोध पर उतनी ही शक्ति प्रदान करता है, जितनी दी गयी परिवर्ती धारा का बल। ऐंपियरमापी व वोल्टमापी अधिकतर स्थितियों में (पर हमेशा नहीं!) धाराबल I व वोल्टता U का कारगर मान ही बताते हैं।

ज्यावत धाराओं के लिये

$$I=\frac{I_0}{\sqrt{2}}, \; U=\frac{U_0}{\sqrt{2}}. \tag{4.80}$$

परिपथ में परिवर्ती धारा द्वारा उत्पन्न औसत शक्ति

$$P=UI \cos \varphi. \tag{4.81}$$

राशि $\cos \varphi$ को **शक्ति-गुणक** कहते हैं।

परिवर्ती धारा की प्रेरिता L परिपथ में लगाये गये प्रतिरोध जैसा काम करती है, अर्थात् परिवर्ती धारा का बल कम करती है। **प्रेरज प्रतिरोध** निम्न सूत्र से निर्धारित होता है :

$$r_L=\omega L. \tag{4.82}$$

यह प्रतिरोध कुंडली में उपस्थित स्वप्रेरण के विभव से उत्पन्न होता है। यदि उपकरण में सिर्फ प्रेरज प्रतिरोध लगा है, तो परिवर्ती धारा उस उपकरण में प्रयुक्त तीव्रता से प्रावस्था के अनुसार 90° पीछे रहती है।

परिवर्ती धारा के परिपथ में लगी धारिता धारा को गुजारती है (स्थिर धारा के साथ यह नहीं होता)। परिवर्ती धारा को धारिता प्रदान करने वाला प्रतिरोध **धारक प्रतिरोध** कहलाता है। धारक प्रतिरोध है :

$$r_C=\frac{1}{\omega C} \tag{4.83}$$

धारक (संघनक) में धारा प्रयुक्त वोल्टता से 90° आगे रहती है।

सक्रिय प्रतिरोध, प्रेरिता, ग्राहिता व परिवर्ती वोल्टता के स्रोत को शृंखला में जोड़ने पर (चित्र 65 a) परिपथ का पूर्ण प्रतिरोध (impedance) होगा

$$Z=\sqrt{r^2+(r_L-r_C)^2} \tag{4.84}$$

परिवर्ती वोल्टता के स्रोत के साथ प्रेरिता, धारिता व प्रतिरोध को चित्र 65a की भांति शृंखल क्रम में जोड़ने से प्राप्त परिपथ को **शृंखल अनुनादी आकृति** कहते हैं।

शृंखल अनुनादी आकृति में धारा-बल का आयाम

$$I=\frac{U_0}{Z}=\frac{I_{anu}}{1+Q^2(\omega/\omega_0-\omega_0/\omega)^2} \tag{4.85}$$

जहां Q व ω_0 आकृति की उत्कृष्टता और अनुनाद की आवृत्ति है, I_{anu} अनुनाद की स्थिति में धारा की आवृत्ति है (ये तीनों राशियां आगे चल कर सविस्तार समझायी गयी है), U_0 व ω बाह्य वोल्टता के आयाम व आवृत्ति है।

धारा व बाह्य वोल्टता के बीच प्रावस्था का अंतर निम्न समीकरण से निर्धारित होता है :

$$\text{tg}\ \varphi = (r_L - r_C)/r \quad \text{या} \quad \cos\varphi = r/Z. \qquad (4.86)$$

यदि शृंखल अनुनादी आकृति में $r_L = r_C$, तो $\varphi = 0$: पूर्ण प्रतिरोध Z का मान निम्नतम होता है (r के बराबर: दे. चित्र 70), और धारा-बल का आयाम महत्तम मान (I_{anu}) रखता है (जब बाह्य वोल्टता U_0 का मान स्थिर हो)। इस संवृति को **शृंखल वैद्युत अनुनाद** (या **वोल्टता का अनुनाद**) कहते हैं।

वोल्टताओं के अनुनाद में प्रेरिता व संघनक पर वोल्टताओं के आयाम समान होते हैं, पर इन वोल्टताओं (u_L व u_C) के क्षणिक मान प्रावस्था की दृष्टि से परस्पर विपरीत होते हैं।

अनुनाद की स्थिति में संघनक पर वोल्टता के आयाम U_C व बाह्य परिवर्ती वोल्टता के आयाम U_0 का अनुपात आकृति की **उत्कृष्टता** Q कहलाता है। यदि $r/(2L) \ll \omega_0$, तो $Q = \omega_0 L/r = 1/(\omega_0 Cr)$: ω_0 अनुनादी आवृत्ति है, जो परिस्थिति $r_L = r_C$ द्वारा निर्धारित होती है।

अनुनाद में (यदि $Q > 1$) संघनक व प्रेरिता पर वोल्टताओं के आयाम बाह्य वोल्टता के आयाम से बहुत अधिक होते हैं, क्योंकि $U_L = U_C = QU_0$.

चित्र 65. शृंखल (a) और समांतर व अनुनादी (b) आकृतियां।

धारिता C, प्रेरिता L व सक्रिय प्रतिरोध r को परिवर्ती वोल्टता के स्रोत के साथ समांतर क्रम में जोड़ा जा सकता है (चित्र 65b)। इस प्रकार से जोड़ी गयी आकृति LCr को **समांतर अनुनादी आकृति** कहते हैं। चित्र 65b में दिखायी गयी समांतर अनुनादी आकृति का पूर्ण प्रतिरोध निम्न समीकरण द्वारा निर्धारित होता है :

$$\frac{1}{Z^2} = \frac{1}{r^2} + \left(\frac{1}{r_L} - \frac{1}{r_C}\right)^2, \qquad (4.87)$$

और पूरे परिपथ में वोल्टता u व धारा i के बीच प्रावस्था-अंतर — निम्न समीकरण से :

$$\text{tg}\ \varphi = r\left(\frac{1}{r_L} - \frac{1}{r_C}\right). \qquad (4.88)$$

प्रावस्था-अंतर $\varphi = 0$ होगा, यदि $r_L = r_C$; इस संवृति को **समांतर वैद्युत अनुनाद** (या **धारा का अनुनाद**) कहते हैं। समांतर अनुनाद में पूर्ण प्रतिरोध Z का मान महत्तम होता है (Z_{max}), पूरे परिपथ में धारा-बल का आयाम I निम्नतम मान (I'_{anu}) रखता है, संघनक व प्रेरिता में धारा-बलों I_C व I_L के आयाम बराबर होते हैं, पर धारा i_C व i_L के क्षणिक मान प्रावस्था की दृष्टि से विपरीत होते हैं। समांतर अनुनादी आकृति की उत्कृष्टता $Q = I_C / I'_{anu} = I_L / I'_{anu}$; यदि $Q > 1$, तो अनुनाद की स्थिति में शाखा L व C के धारा-बलों के आयाम पूर्ण धारा I'_{anu} के आयाम से अधिक होंगे। आदर्श समांतर आकृति (दे. चित्र 65b) में ω/ω_0 पर अनुपात I'_{anu}/I की निर्भरता वैसी ही होती है, जैसी शृंखल अनुनादी आकृति में I/I_{anu} की (दे. चित्र 72); ω_0 अनुनाद की आवृत्ति है, जो परिस्थिति $r_L = r_C$ द्वारा निर्धारित होती है।

समांतर आकृति का सही हिसाब लगाने के लिए परिपथ में सक्रिय प्रतिरोध के L व C को ध्यान में रखना चाहिये। प्रेरिता व धारिता में सक्रिय हानि की स्थिति में ω/ω_0 पर अनुपात Z/Z_{max} की निर्भरता चित्र 71 के ग्राफ में दिखायी गयी है।

परिवर्ती धारायुक्त चालक में प्रेरित धारा उत्पन्न होती है, जिसके कारण चालक की सतह पर धारा का घनत्व अधिक हो जाता है, बनिस्बत कि उसके बीच में। उच्च आवृत्तियों पर चालक के अक्ष के पास धारा का घनत्व व्यावहारिकतः शून्य हो जा सकता है। इस संवृति को **सतह-प्रभाव** (या **त्वचीय प्रभाव**) कहते हैं।

2. दोलक आकृति

वैद्युत राशियों (आवेश, धारा-बल, वोल्टता) में सीमित परिवर्तन, जो किसी औसत मान के सापेक्ष पूर्णतः या अंशतः दुहराते रहते है, **वैद्युत दोलन** कहलाते है। परिवर्ती वैद्युत धारा विद्युत-दोलन का ही एक प्रकार है।

उच्च आवृत्ति के वैद्युत दोलन अधिकतर स्थितियों में दोलक आकृति की सहायता से प्राप्त होते हैं।

दोलक आकृति एक संवृत परिपथ है, जिसमें प्रेरिता L और धारिता C होती है।

आकृति के नैसर्गिक या स्वतंत्र दोलन का आवर्त काल

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \tag{4.89}$$

इस संबंध को **टाम्सन का सूत्र** कहते हैं। यह तब लागू होता है, जब ऊर्जा की हानि नही होती। आकृति में ऊर्जा-हानी होने पर (जैसे सक्रिय प्रतिरोध r के कारण) आकृति का स्वतंत्र दोलन नश्वर होता है और

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{r}{2L}\right)^2}} \tag{4.90}$$

तथा आकृति में धारा नश्वर दोलन के नियम के अनुसार बदलती रहती है :

$$i = I_0 e^{-\frac{r}{2L}t} \sin \omega t \tag{4.91}$$

नश्वर दोलनों का ग्राफ पृ. 108 पर (चित्र 26) देखें।

दोलक आकृति पर परिवर्ती विवाव के प्रभाव से आकृति में **आरोपित दोलन** उत्पन्न होते हैं। L, C, r के मान स्थिर होने पर धारा के आरोपित दोलनों का आयाम आकृति के दोलनों की निजी आवृत्ति और ज्यावत विवाव के परिवर्तन की आवृत्ति के अनुपात पर निर्भर करता है (दे. चित्र 72)।

3. विद्युच्चुंबकीय क्षेत्र

बियो-सावार्ट-लैप्लेस के नियमानुसार (दे. पृ. 178) धारायुक्त चालक के गिर्द संवृत बल-रेखाओं वाला चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न होता है। ऐसे क्षेत्र को **भंवरी** कहते है। जिस चालक में परिवर्ती धारा बहती है, उसके गिर्द परिवर्ती चुंबकीय क्षेत्र बनता है।

परिवर्ती धारा संघनक से गुजरती है (दे. पृ. 197, स्थिर धारा नही गुजरती); पर यह धारा चालकता की धारा नहीं होती; इसे **स्थानांतरण-धारा** कहते है। स्थानांतरण-धारा कालांतर से बदलने वाला विद्युत-क्षेत्र है: वह चालकता की परिवर्ती धारा जैसा परिवर्ती चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करती है। स्थानांतरण-धारा का घनत्व

$$j = \frac{\Delta D}{\Delta t}, \tag{4.92}$$

जहां D = वैद्युत क्षेत्र का स्थानांतरण।

कालांतर से वैद्युत क्षेत्र के स्थानांतरण में परिवर्तन के कारण व्योम के प्रत्येक बिंदु पर परिवर्ती भंवरी चुंबकीय क्षेत्र बनता है (चित्र 66a)। उत्पन्न चुंबकीय क्षेत्र के सदिश **B** सदिश **D** के लंबवत समतलों पर होते हैं। इस नियमसंगति को व्यक्त करने वाला गणितीय सूत्र **मैक्सवेल का प्रथम समीकरण** कहलाता है।

चित्र 66. वैद्युत क्षेत्र के स्थानांतरण में परिवर्तन से चुंबकीय क्षेत्र की उत्पत्ति (मैक्सवेल का प्रथम समीकरण), (b) चुंबकीय प्रेरण में परिवर्तन से भंवरी वैद्युत क्षेत्र की उत्पत्ति (मैक्सवेल का दूसरा समीकरण)।

विद्युच्चुंबकीय प्रेरण के कारण संवृत बल-रेखाओं वाला वैद्युत क्षेत्र (भंवरी क्षेत्र) उत्पन्न होता है, जो प्रेरण के विवाव (दे. पृ. 181) के रूप में प्रकट होता है। वैद्युत क्षेत्र के प्रेरण में समय के अनुसार परिवर्तनों के कारण व्योम के हर बिंदु पर भंवरी विद्युत-क्षेत्र उत्पन्न होता है (चित्र 66b)। उत्पन्न विद्युत-क्षेत्र के सदिश **D** सदिश **B** के अभिलंबी तलों पर होते है। इस नियम-संगति को व्यक्त करने वाला गणितीय समीकरण **मैक्सवेल का दूसरा समीकरण** कहलाता है।

एक-दूसरे से अटूट वैद्युत व चुंबकीय क्षेत्र मिल-जुल कर **विद्युचुंबकीय क्षेत्र** कहलाते हैं ।

चित्र 67. विद्युचुंबकीय तरंग में सदिश **E**, **H** व **S** की पारस्परिक स्थितियां ।

मैक्सवेल के समीकरणों से निष्कर्ष निकलता है कि वैद्युत (या चुंबकीय) क्षेत्र में समय के अनुसार होने वाले सभी परिवर्तन एक बिंदु से दूसरे बिंदु पर प्रसारित होते रहते हैं । इस प्रक्रिया में वैद्युत व चुंबकीय क्षेत्रों का परस्पर रूपांतरण होता रहता है । विद्युचुंबकीय तरंग परिवर्तनशील वैद्युत व चुंबकीय क्षेत्रों का व्योम में परस्पर संबद्ध प्रसरण है । असीम व्योम में प्रसरण करती विद्युचुंबकीय तरंग में वैद्युत व चुंबकीय क्षेत्रों की तीव्रताओं के सदिश (**E** व **H**) परस्पर लंब होते हैं, और प्रसरण की दिशा सदिश **E** व **H** के तल के साथ लंब होती है (चित्र 67) ।

निर्वात में विद्युचुंबकीय तरंगों के प्रसरण का वेग तरंग-लंबाई पर निर्भर नहीं करता और उसका मान होता है

$$c = 2.997925 \cdot 10^8 \text{m/s}.$$

विभिन्न माध्यमों में विद्युचुंबकीय (संक्षेप में विचु—अनु.) तरंगों के वेग निर्वात में उसके वेग से कम होते हैं :

$$c_1 = \frac{c}{n}, \qquad (4.93)$$

जहां n = माध्यम का अपवर्तनांक (दे. पृ. 213) ।

विचु तरंगें ऊर्जा वहन करती हैं ।

विकिरण-प्रवाह का तलीय घनत्व **S** एक ऐसी राशि है, जिसका मापांक तरंग द्वारा प्रसरण की दिशा के लंब स्थित तल के इकाई क्षेत्रफल से इकाई समय में वहन की जाने वाली ऊर्जा के बराबर होता है :

$$\mathbf{S} = [\mathbf{EH}]. \qquad (4.94)$$

सदिश **S** को प्वाइंटिंग सदिश कहते हैं ; उसकी दिशा तरंग-प्रसर की दिशा के साथ लंब होती है ।

4. विद्युचुंबकीय तरंगों का उत्सर्जन

त्वरण के साथ गतिमान आविष्ट कण विचु तरंगों को उत्सर्जित करते हैं । द्विध्रुव (दे. पृ. 134), जिसके आवेशों की परस्पर दूरी संनादी नियम $l_0 \cos \omega t$ के अनुसार बदलती है, विचु तरंग उत्सर्जित करते हैं, जिनका विकिरण-प्रवाह है

$$\phi_d = Q^2 \omega^4 \bar{l}_0^2 / (12 \pi \varepsilon_0 c^3), \qquad (4.95)$$

जहां Q = द्विध्रुव का आवेश, ε_0 = वैद्युत स्थिरांक, ω = चक्रीय आवृति, c = निर्वात में तरंग-वेग । ϕ_d इकाई समय में उत्सर्जित ऊर्जा के औसत मान के बराबर की एक राशि है ।

विचु तरंगों का उत्सर्जन हर ऐसा चालक करता है, जिसमें परिवर्ती धारा बहती है । उत्सर्जन सबसे अधिक कारगर तब होता है, जब उत्सर्जक के माप विकिरण-तरंगों की लंबाइयों के साथ तुलनीय होते हैं । विचु तरंगों को कारगर ढंग से उत्सर्जित (या ग्रहण) करने वाला चालक एंटेना या **एरियल** कहलाता है ।

धारा का मूल $i\Delta l$, जिसमें धारा-बल संनादी नियम $i = I_0 \cos \omega t$ के अनुसार बदलता है, विचु क्षेत्र उत्सर्जित करता है, जिसमें वैद्युत व चुंबकीय क्षेत्रों की तीव्रताएं क्रमश:

$$E_\theta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \cdot I_0 \frac{\Delta l}{\lambda r} \sin \theta \cos (\omega t - kr) \qquad (4.96)$$

और

$$H_\theta = \frac{1}{2} I_0 \frac{\Delta l}{\lambda r} \sin \theta \cos (\omega t - kr) \qquad (4.97)$$

होती हैं, जहां θ धारा-मूल $i\Delta l$ व प्रेक्षण-बिंदु को मिलाने वाली सरल रेखा, और चालक में धारा की दिशा के बीच का कोण है, $k = 2\pi/\lambda$ = तरंग-

चित्र 68. धारा-मूल द्वारा वैद्युत व चुंबकीय क्षेत्रों की तीव्रताओं का कलन।

संख्या, λ=तरंग की लंबाई, r=धारा-मूल व बिंदु A की आपसी दूरी, जिस पर तीव्रता मापी जा रही है; साथ ही : $r \gg \lambda$, $r \gg \Delta l$ (चित्र 68)।

धारा-मूल $i\Delta l$ द्वारा उत्पन्न विकिरण-प्रवाह ϕ_1 निम्न सूत्र द्वारा कलित होता है :

$$\phi_1 = \frac{2\pi}{3}\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}\left(\frac{i\Delta l}{\lambda}\right)^2 \qquad (4.98)$$

सारणी और ग्राफ

स्थिर व परिवर्ती धाराओं के लिए प्रतिरोध

परिवर्ती व स्थिर धाराओं के विरुद्ध प्रतिरोधों का अनुपात परामितक ξ पर निर्भर करता है

$$\xi = 0.14d\sqrt{\frac{\mu f}{\rho}},$$

जहां d=चालक का व्यास (cm में), f=आवृत्ति (Hz में), ρ=विशिष्ट प्रतिरोध (Ω·cm में), μ=चुंबकीय वेधिता।

चित्र 69. परामितक ξ पर परिवर्ती व स्थिर धाराओं पर प्रतिरोधों के अनुपात की निर्भरता।

आवृत्ति पर प्रेरज, धारक व पूर्ण प्रतिरोधों की निर्भरता

चित्र 70. शृंखल अनुनादी आकृति में प्रेरज, धारक व पूर्ण प्रतिरोधों में आवृत्ति के साथ होने वाले परिवर्तन।

चित्र 71. समांतर अनुनादी आकृति में आवृत्ति पर पूर्ण प्रतिरोध Z की निर्भरता। अक्षों पर सापेक्षिक मान Z/Z_{max} व ω/ω_0 लिये गये हैं। कलन उस स्थिति के लिये है, जब L व C शाखाओं में सक्रिय प्रतिरोध समान हों।

श्रृंखल अनुनादी आकृति में आवृत्ति पर धारा-बल की निर्भरता

चित्र 72. श्रृंखल अनुनादी आकृति में आवृति पर धारा-बल की निर्भरता ।

सारणी *108*. **तांबे के तार में उच्चावृत्ति वाली धारा की वेधन-गहनता** σ

आवृति, MHz	0.01	0.1	1	10	100
σ, mm	0.65	0.21	0.065	0.021	0.006

टिप्पणी :—1. अन्य आवृतियों तथा अन्य द्रव्यों के लिये σ का मान निम्न सूत्र द्वारा ज्ञात हो सकता है :

$$\sigma = 5033\sqrt{\rho/(\mu \cdot f)},$$

जहां σ—वेधन की गहराई (cm), ρ—विशिष्ट प्रतिरोध (Ω·cm), μ—द्रव्य की चुंबकीय वेधिता, f—आवृति (Hz) ।

2. **वेधन-गहनता** (वेधन की गहराई) तार की सतह से उस दूरी को कहते है, जहां (सतह की तुलना में) धारा का घनत्व e गुना कम होता है; e—प्राकृतिक लघुगणक का आधार ($e \approx 2.72$) है ।

सारणी *109*. **विद्युचुंबकीय विकिरण का पैमाना**

तरंग-लंबाई	आवृति (Hz)	परास	तरंगों (या आवृतियों) के प्रप	प्राप्ति की मुख्य विधियां और उपयोग
10^8 km	10^{13}; 3×10^{-3}	अल्प-आवृति की तरंगें	अवाल्प आवृति	विशेष संरचना के जनित्र
			अल्प आवृतियां	
10^6 km	10^{11}; 3×10^{-1}		औद्योगिक आवृतियां	परिवर्ती धारा के जनित्र (परिवर्तक); अधिकतर वैद्युत उपकरण व जनित्र 50-60 Hz वाली परिवर्ती धारा का उपयोग करते हैं
10^5 km	10^{10}			
10^3 km	10^8; 3×10^2		स्वनिक आवृतियां	स्वनावृति-जनित्र; उपयोग—विद्युत्स्वन (माइक्रोफोन, लाउड-स्पीकर), सिनेमा, रेडियो-प्रसारण में
1 km	10^5; 3×10^5	रेडियो-तरंगें	दीर्घ	भिन्न संरचनाओं के विद्योलक जनित्र; उपयोग—टेलीग्राफ, रेडियो-प्रसारण, टेलीविजन, रेडियो-लोकेशन में
			मध्यम	
			लघु	
1 m	10^2; 3×10^8		मीटर	उपयोग—द्रव्य के गुणों के अध्ययन में
1 dm	10; 3×10^9		डेसीमीटर	

(सारणी 109 का शेष)

तरंग-लंबाई	आवृत्ति (Hz)	परास	तरंगों (या आवृत्तियों) के ग्रुप	प्राप्ति की मुख्य विधियां और उपयोग
		रेडियो-तरंगें	सेंटीमीटर	मैग्नेट्रोन- व क्लिस्ट्रोन-जनित्रों और मेसर (maser) द्वारा उत्पन्न; उपयोग—रडार, सूक्ष्मतरंगी स्पेक्ट्रमदर्शी और रेडियो-ज्योतिविज्ञान में
1cm — 1	3×10^10		मिलिमीटर	
1mm — 10^-1	3×10^11		मध्यवर्ती	
		अवरक्त किरणें	डेका-माइक्रोन	तप्त पिंडों (आर्क व गैसीय निराविष्टक बल्बों आदि) से विकरणित; उपयोग—अवरक्त स्पेक्ट्रमदर्शी व अंधेरे में फोटोग्राफी के लिये (अवरक्त किरणों में)
1μm — 10^-4	3×10^14		माइक्रोन	
		प्रकाश-किरणें		
		पराबैंगनी	निकट	सूर्य, पारद-वाष्प बल्ब आदि के विकिरण से; उपयोग—पराबैंगनी सूक्ष्मदर्शी, प्रदीप्ति बल्ब और चिकित्सा में
1nm — 10^-7	3×10^17		दूर	
1Å — 10^-8	3×10^18	एक्स-रे	परागर्म	एक्स-रे-नली व अन्य उपकरणों से उत्पन्न होती है, जिनमें 1 keV ऊर्जा वाले एलेक्ट्रोन मंदित होते हैं; उपयोग—निदान के लिये (चिकित्सा में), द्रव्य की रचना के अध्ययन में, त्रुटि-खोज (flaw detection) में
			नर्म	
			कठोर	

(सारणी 109 का शेष)

तरंग-लंबाई	आवृत्ति (Hz)	परास	तरंगों (या आवृत्तियों) के ग्रुप	प्राप्ति की मुख्य विधियां और उपयोग
1X — 10^{-11}	3×10^{21}	गामा-किरणें		नाभिकों के रश्मि सक्रिय क्षय में, 0.1 MeV वाले एलेक्ट्रोन के मंदन से तथा अन्य प्राथमिक कणों की व्यतिक्रिया से उत्पन्न होती है; उपयोग—गामा त्रुटि-खोज व द्रव्य के गुणों के अध्ययन में

टिप्पणी :—सारणी में लघुगणकी पैमाना दिया गया है। प्रथम स्तंभ में तरंग की लंबाइयां है (दायें cm में और बायीं ओर लंबाई की अन्य इकाइयों में), स्तंभ 2 में—आवृत्ति (Hz में), स्तंभ 3 में—परासों के नाम, स्तंभ 4 में—आवृत्तियों (या तरंगों) के ग्रुपों के नाम, स्तंभ 5 में—विद्युचुंबकीय दोलनों को प्राप्त करने की मुख्य विधियां और उनके उपयोग।

अल्पावृत्ति वाली व रेडियो तरंगों की आवृत्ति सबसे कम होती है; ये तरंग विभिन्न कृत्रिम दोलकों द्वारा विकिरणित होती हैं।

अवरक्त विकिरण मुख्यतः परमाणुओं या अणुओं के दोलन से प्राप्त होती है।

प्रकाश तरंगें या पराबैंगनी विकिरण अणुओं या परमाणुओं में बाह्य अंशों के एलेक्ट्रोन की अवस्था-परिवर्तन से प्राप्त होती है (दे. पृ. 250)।

एक्स-किरणें परमाणु के आंतरिक अंश में एलेक्ट्रोन की अवस्था-परिवर्तन (**लक्षक विकिरण**) से, या एलेक्ट्रोन अथवा अन्य आविष्ट कण का तेजी से मंदन करने से प्राप्त होती है।

गामा किरणें नाभिकों के उद्दीपन तथा अन्य प्राथमिक कणों की व्यतिक्रिया से प्राप्त होती हैं।

कुछ प्रकार की तरंगों के बारे में सूचनाएं अगले अध्याय ("प्रकाशिकी") में मिलेंगी।

प्रकाशिकी

मूल अवधारणाएं और नियम

प्रकाशिकीय विकिरण (प्रकाश) 0.01 nm से 1 cm की तरंग-लंबाइयों वाला विद्युत्चुंबकीय विकिरण है। ऐसी तरंगों का स्रोत परमाणु व अणु होते हैं, जिनमें एलेक्ट्रोनों की ऊर्जीय अवस्था में परिवर्तन होता है (दे. पृ. 248)। प्रकाशिकीय विकिरण में **दृश्य विकिरण** का परास विशिष्ट है, जिसमें 400 से 760 nm की लंबाइयों वाली तरंगें आती हैं।

1. ऊर्जीय और प्रकाशीय राशियां. प्रकाशमिति

विकिरण-ऊर्जा यह किसी पिंड या माध्यम द्वारा उत्सर्जित फोटोनों (दे. पृ. 227) या विद्युत्चुंबकीय तरंगों (दे. पृ. 203) की ऊर्जा है। मनोवांछित तल से विद्यु तरंगों द्वारा इकाई समय में वहन की जाने वाली ऊर्जा के औसत मान को **विकिरण-प्रवाह** कहते हैं। मानवीय आँख पर अपने प्रभाव के अनुसार मूल्यांकित विकिरण-प्रवाह **ज्योति-प्रवाह** कहलाता है।

विकिरण प्रवाहों के ऊर्जीय लक्षक. विकिरण-प्रवाह ϕ_e और इस विकिरण के प्रसरण के व्योम कोण Ω के अनुपात को **प्रकाश की ऊर्जीय तीव्रता (विकिरण-तीव्रता)** कहते हैं :

$$I_e = \phi_e / \Omega, \qquad (5.1)$$

इसकी इकाई है वाट प्रति स्टेरेडियन (W/sr)।

ऊर्जीय प्रकाशिता विकिरण-प्रवाह ϕ_e और उसके द्वारा समरूपता से प्रकाशित सतह के क्षेत्रफल S के अनुपात को कहते हैं :

$$E_e = \phi_e / S; \qquad (5.2)$$

इकाई— वाट प्रति वर्ग मीटर (W/m²)।

ऊर्जीय प्रदीप्ति विकिरण-प्रवाह ϕ_e और विकिरणकारी सतह के क्षेत्रफल S_s के अनुपात को कहते हैं :

$$R_e = \phi_e / S_s; \qquad (5.3)$$

इकाई—वाट प्रति वर्ग मीटर (W/m²)।

विकिरण-प्रवाह के प्रकाशीय लक्षक. भिन्न तरंग-लंबाइयों वाले प्रवाह के प्रति आँखें समान रूप से संवेदनशील नहीं होतीं। दिन के प्रकाश में आँखें ज्यादातर 555 nm तरंग-लंबाई वाले प्रकाश के प्रति सबसे अधिक संवेदनशील होती हैं। 555 nm तरंग-लंबाई वाले विकिरण-प्रवाह ϕ_{555} और λ तरंग-लंबाई वाले विकिरण-प्रवाह ϕ_λ के अनुपात को **आँखों की सापेक्षिक स्पेक्ट्रमी संवेदनशीलता या सापेक्षिक दृश्यमानता** (सापेक्षिक प्रदीप्ति-क्षमता, K_λ) कहते हैं : $K_\lambda = \phi_{555} / \phi_\lambda$। λ पर K_λ की निर्भरता के ग्राफ को सापेक्षिक स्पेक्ट्रमी संवेदनशीलता का वक्र कहते हैं। झुटपुटे प्रकाश में आँख सबसे अधिक 507 nm तरंग-लंबाई वाले प्रकाश के प्रति संवेदनशील होती है। दिन के प्रकाश में 1 W विकिरण-प्रवाह 680 lm (ल्युमेन, दे. आगे) ज्योति-प्रवाह के अनुरूप होता है; झुटपुटे प्रकाश में 507 nm तरंग-लंबाई वाला 1 W विकिरण-प्रवाह 1745 lm के अनुरूप होता है।

प्रेक्षक से दूरी की तुलना में नगण्य रैखिक मापों वाले स्रोत को **बिंदु-स्रोत** कहते हैं।

ज्योति-प्रवाह की प्रकाश-शक्ति नापने के लिए कैंडेला (cd) नामक इकाई प्रयुक्त होती है। **कैंडेला** *ऐसी प्रकाश-शक्ति को कहते हैं, जो पूर्ण विकिरक* (दे. पृ. 231) *की 1/600000 m² सतह द्वारा लंब दिशा में उत्सर्जित होती है;* यहां विकिरक का तापक्रम प्लैटिनम के जमनांक के बराबर (2042 K) है और दाब 101 325 Pa है। कैंडेला की गिनती अ. प्र. की मूल इकाइयों में होती है; इसे निर्धारित करने के लिए विशेष बनावट का मानक तैयार किया गया है।

ज्योति-प्रवाह बिंदु-स्रोत की प्रकाश-शक्ति I और व्योम कोण Ω के गुणनफल के बराबर की राशि को कहते हैं : $\phi = I\Omega$।

ज्योति-प्रवाह की इकाई ल्युमेन (lm) है। **ल्युमेन** ऐसे ज्योति-प्रवाह को कहते हैं, जो 1 cd प्रकाश-शक्ति के बिंदु-स्रोत द्वारा 1 sr के व्योम कोण में उत्सर्जित होता है। बिंदु-स्रोत द्वारा उत्सर्जित कुल ज्योति-प्रवाह

$$\phi_p = 4\pi I. \qquad (5.4)$$